Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Электрические станции»

С.П. Ржевская

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ. ДИЭЛЕКТРИКИ

Курс лекций

Минск 2009

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Электрические станции»

С.П. Ржевская

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ. ДИЭЛЕКТРИКИ

Курс лекций

Минск 2009

Рецензенты:
Е.В. Калентионок, А.А. Гончар

Ржевская, С.П.
Электрические материалы. Диэлектрики: курс лекций / С.П. Ржевская. – Минск: БНТУ, 2009. – 142 с.

ISBN 978-985-479-966-7.

В данном конспекте лекций изложены основы физики явлений, происходящих в диэлектрических материалах, а также их физико-химические и электрические свойства. Рассмотрены основные электрические параметры диэлектриков и методы их измерения. Даны сведения о технологии производства важнейших электроизоляционных материалов и их применении.

Конспект предназначен для студентов специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение», 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы».

УДК 621.3.002.3 (075.8)
ББК 31.23я7

ISBN 978-985-479-966-7

© Ржевская С.П., 2009
© БНТУ, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3
1. Общие сведения о строении вещества 6
1.1. Виды химической связи 6
1.2. Классификация веществ по электрическим свойствам. Основы зонной теории 9
2. Физические процессы в диэлектриках в электрическом поле .. 15
2.1. Поляризация диэлектриков 15
2.2. Влияние агрегатного состояния на диэлектрическую проницаемость диэлектриков 21
2.3. Электропроводность и токи диэлектриков 25
2.3.1.Электропроводность газов 27
2.3.2. Электропроводность жидкостей 28
2.3.3. Электропроводность твердых диэлектриков 30
2.3.4. Измерение объемного (R_v) и поверхностного (R_S) сопротивлений диэлектриков 32
2.4. Диэлектрические потери 33
2.4.1.Диэлектрические потери в газах 36
2.4.2.Диэлектрические потери в жидких диэлектриках 37
2.4.3.Диэлектрические потери в твердых диэлектриках ... 38
2.4.4.Измерение диэлектрических потерь 40
2.5. Пробой диэлектриков 43
2.5.1.Виды (теории) пробоя 44
2.5.2. Пробой газов 44
2.5.3. Пробой жидких диэлектриков 48
2.5.4. Пробой твердых диэлектриков 50
3. Диэлектрики 56
3.1. Газы в качестве электрической изоляции 56
3.2. Жидкие диэлектрики 58
3.2.1. Минеральные (нефтяные) масла 59
3.2.2. Синтетические жидкие диэлектрики 63
3.3. Твердые электроизоляционные материалы 66
3.3.1. Состав и структурные формы полимеров 67
3.3.2. Методы получения полимеров 69
3.3.3. Полимеры с малыми диэлектрическими потерями (неполярные) 71

3.3.4. Полимеры с повышенными диэлектрическими потерями (полярные) 79
3.3.5. Элементоорганические полимеры 92
3.3.6. Волокнистые материалы 95
3.3.7. Композиционные материалы (пластмассы). Слоистые пластики. Электроизоляционные лаки, клеи и компаунды 99
3.3.8. Эластомеры 107
3.3.9. Основные способы изготовления изделий из полимеров и пластмасс 111
3.4. Твердые неорганические электроизоляционные материалы 115
3.4.1. Электроизоляционные стекла 116
3.4.2. Ситаллы 125
3.4.3. Керамические материалы 128
3.4.4. Слюда и материалы на ее основе 134
Литература 141

ВВЕДЕНИЕ

К электротехническим материалам относятся:

– проводники, служащие для прохождения электрического тока;

– диэлектрики, используемые в основном для изоляции проводников, а также в конденсаторах;

– полупроводниковые материалы для приборов и устройств электроники;

– магнитные материалы для создания или усиления магнитного поля.

Современные материалы должны удовлетворять следующим основным требованиям: они должны быть долговечны, надежны, технологичны, экологически чисты и по возможности недефицитны.

Правильное применение этих материалов позволяет решить ряд сложных технических задач, увеличить надежность электротехнических устройств, уменьшить их габариты и вес.

Благодаря прогрессу в области изучения свойств материалов и разработке новых технологий создались совершенно новые отрасли науки и техники. Это микроэлектроника, оптоэлектроника и создание волоконнооптических линий связи. И, наконец появилась совсем новая отрасль прикладной науки и техники – нанотехнологии. Каждый новый технический прогресс базируется на трех основах: физика – материал – технология.

В связи с этим, дисциплина «Электротехнические материалы» решает следующие задачи:

1) изучение физических процессов, происходящих в материалах, и установление взаимосвязи между микростроением вещества и его макроскопическими свойствами;

2) классификация материалов по их основным электрофизическим свойствам, составу и назначению;

3) рассмотрение основных характеристик материалов с целью оценки пригодности материала к использованию в электротехнических устройствах и установках;

4) изучение основных особенностей технологии изготовления материалов.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ ВЕЩЕСТВА

1.1. Виды химический связи.
1.2. Классификация веществ по электрическим свойствам. Основы зонной теории.

1.1. Виды химической связи

Основными элементарными частицами, из которых состоят все известные нам вещества, являются протоны, нейтроны и электроны.

Из протонов и нейтронов состоят атомные ядра. Электроны заполняют оболочки атома, компенсируя положительный заряд ядра.

В основе современной квантовой теории строения атомов и молекул лежит представление о двойственной природе микрообъектов (электронов) – они обладают одновременно корпускулярными и волновыми свойствами. В квантовой механике движение электрона описывается волновой функцией де Бройля; причем в атоме разрешенными для электрона орбитами являются только те, на которые ($2\pi r$) укладывается только целое число длин волн де Бройля, т.е. $2\pi r = \lambda \cdot n$, где $n = 1,2,3,\ldots,5$. Расчеты показывают, что энергия электрона минимальна, если он движется в пределах сферы радиуса $r_0 = 0{,}529 \cdot 10^{-10}$м, причем его точное положение внутри данной сферы принципиально не может быть указано. При $r < r_0$ энергия электрона возрастает (рис. 1).

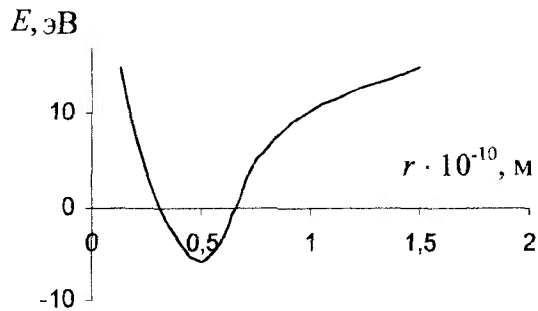


Рис. 1. Зависимость энергии (E) электрона от радиуса (r) области, в которой происходит движение

Газы, жидкие и твердые тела состоят из атомов, молекул или ионов. Размеры атома порядка 10^{-10} м.

Известно, что наименьшая частица вещества, обладающая его основными химическими свойствами, – это молекула. Молекулы состоят из одинаковых или различных атомов, соединенных между собой в одно целое междуатомными силами, которые называют химическими связями.

Экспериментальные факты свидетельствуют, что силы междуатомного взаимодействия в молекулах возникают между внешними (валентными) электронами, поскольку эти электроны менее связаны с ядром и потенциалы ионизации их значительно меньше, чем у электронов, расположенных на внутренних оболочках.

Энергией ионизации называется энергия, которую необходимо затратить для удаления электрона из нейтрального атома или молекулы. Энергия ионизации (Эи), отнесенная к заряду электрона q, называется потенциалом ионизации (ионизационным потенциалом) Uи; Uи = Эи/q.

Различают несколько видов химической связи.

Гетерополярная (ионная) связь

Простейшее объяснение этого вида связи заключается в том, что между внешними (валентными) электронами атомов возникают электрические силы взаимодействия. Непременным условием устойчивости молекулы в этом случае будет способность атомов удерживать валентные электроны. Атомы с низкой энергией ионизации легко отдают один или несколько электронов, превращаясь при этом в положительные ионы. Атомы, способные захватывать электроны при образовании химической связи (электроотрицательные), получают отрицательный заряд и становятся отрицательными ионами. Между разноименно заряженными ионами возникает электростатическое притяжение. Подобный тип связи называют ионной связью.

Типичным примером ионных молекул являются ионные кристаллы – галоидные соли щелочных металлов $Na^+ + Cl^-$, а также керамика, стекла.

Гомеополярная (ковалентная) связь

При этом виде связи объединение атомов в молекулу происходит за счет электронов, которые становятся общими для пар атомов. При этом не происходит переход электронов от одного атома к другому.

Выяснение природы ковалентной связи стало возможным только на основе квантовой теории.

При сближении атомов происходит квантовомеханический эффект – частичное перекрытие их электронных облаков, благодаря чему появляется возможность для электронов обмена местами друг с другом. Электроны становятся тождественны – неразличимы в атоме. Образование устойчивого состояния (молекулы) становится возможным благодаря обменному взаимодействию, возникающему между ядрами взаимодействующих атомов. Аналогу обменного взаимодействия в классической физике нет.

В зависимости от того, связывает ли ковалентная связь одинаковые атомы или различные, расположение электронного облака в молекуле будет симметричным или асимметричным. Молекула с асимметричным распределением электронного облака называется полярной и характеризуется дипольным моментом $p = q \cdot \ell$, где $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $\ell \geq 2...3 \cdot 10^{-10}$ м ; значит, $p \approx 10^{-30}$ Кл·м. Вещества, состоящие из полярных молекул, называются полярными. Вещества, образованные из симметричных молекул, называются неполярными.

В предельном случае, когда преобладает вероятность нахождения электрона у одного из атомов, гомеополярная связь переходит в ионную. Таким образом, непереходимой грани между ионной и гомеополярной связями не существует.

Гомеополярная связь характерна для огромного количества органических молекул, но имеются и неорганические вещества с такой связью, например, газы – O_2, H_2, N_2 и др.; твердые вещества – алмаз, карбид кремния и др.

Металлическая связь

Она существует в металлах. Металлическую связь можно до некоторой степени рассматривать как ковалентную связь, в которой электроны общие для всех атомов. Электроны не локализуются вблизи своих атомов, а свободно перемещаются, образуя «электронный газ». Не имея локализованных связей металлические кристаллы (в отличие от ионных) не разрушаются при изменении положения атомов, им свойственна пластичность, ковкость.

Благодаря наличию свободных электронов металлы обладают высокой электро- и теплопроводностью.

Этот вид связи наблюдается у ряда веществ между полярными (дипольными) молекулами, которые образуют флуктуирующие, осциллирующие диполи. Когда силы притяжения валентных электронов меняются в зависимости от расстояния и расположения соседних диполей в значительной степени, то размеры диполей не устойчивы, изменяются дипольный момент и силы притяжения между диполями. Эта связь неустойчивая, легко разрушается. Кристаллы с такой связью обладают низкой температурой плавления. Эта связь характерна для органических веществ, например, смолы, парафин ($t_{пл} = 55\ ^{\circ}C$).

1.2. Классификация веществ по электрическим свойствам. Основы зонной теории

По своим электрическим свойствам твердые тела разделяются на металлы (проводники), полупроводники и диэлектрики.

Удельное сопротивление металлов при комнатной температуре находится в пределах $10^{-8}...10^{-5}$ Ом·м; полупроводников – $10^{-5}...10^{+8}$ Ом·м; диэлектриков – $10^{8}...10^{18}$ Ом·м. Кроме того, при низких температурах возможно особое сверхпроводящее состояние, в котором сопротивление электрическому току равно нулю.

Согласно представлениям классической физики, диэлектрики отличаются от проводников тем, что при нормальных температурах в них не имеется свободных электрических зарядов. Поэтому их электропроводность отсутствует. В основе объяснения электропроводности металлов, согласно классической теории, лежит понятие об электронном газе, состоящем из свободных электронов, находящихся в состоянии непрерывного хаотического движения. При приложении внешнего напряжения электроны получают добавочную скорость направленного движения, благодаря чему и возникает электрический ток. Сопротивление электрическому току обусловлено столкновениями электронов с узлами кристаллической решетки.

В кристаллической решетке твердого тела ионы расположены почти вплотную, поэтому длина свободного пробега электрона l (среднее расстояние между двумя соударениями) должна быть

порядка постоянной решетки d ($d \approx 10^{-10}$ м). Но расчеты показывают, что тогда сопротивление металлов было бы в сотни и тысячи раз больше, чем в действительности. Такое грубое расхождение с экспериментом свидетельствует, что приведенные положения классической электронной теории неприемлемы. На это указывают и другие экспериментальные факты. Например, экспериментально установлено, что сопротивление металлов возрастает с температурой, а при $T \to 0$ сопротивление достигает минимального не зависящего от температуры значения, называемого остаточным сопротивлением (рис. 2).

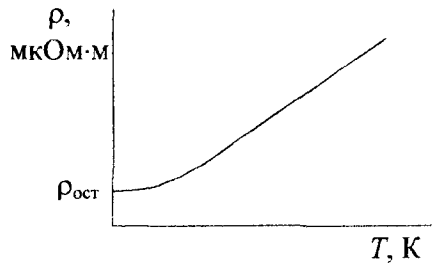


Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления металлов

С точки зрения классической теории, в которой распределение электронов по энергиям подчиняется статистике Максвелла–Больцмана:

$$W_э = A \cdot \ell^{-\frac{Э}{КТ}}, \quad \text{при} \quad T = 0,\ W_э = 0, \qquad (1)$$

получается, что при температуре абсолютного нуля сопротивление должно быть равно нулю, так как все электроны при $T = 0$ должны иметь нулевую энергию. Наличие остаточного сопротивления у металлов $T \to 0$ нашло объяснение в квантовой теории электричества, в которой распределение электронов по энергиям описывается статистикой Ферми–Дирака с функцией распределения:

$$W_э = \frac{1}{\frac{1}{A}\ell^{\Delta Э/КТ} + 1};$$

где $\Delta Э = Э - Э_F$.

При $T = 0$ получим $W_э = 0$, если $Э \geq Э_F$, и $W_э = 1$, если $Э \leq Э_F$, где Э – энергия уровня, вероятность заполнения которого определяется.

Результат $W_Э = 0$ мы рассматривали выше. Результат же $W_Э = 1$ при $Э \leq Э_F$ показывает, что даже при абсолютном нуле температуры есть некоторое количество электронов, кинетическая энергия которых больше нуля, что и объясняет наличие остаточного сопротивления.

$Э_F$ – максимальное значение энергии, которую может иметь электрон в металле при температуре абсолютного нуля. Эта энергия называется энергией Ферми, или уровнем Ферми. При концентрации электронов в твердом кристалле 10^{22} см^3 эта энергия составит несколько электрон-вольт (~ 5 эВ), а скорость электронов, обладающих энергией Ферми, имеет величину 10^6 м/с.

При высоких температурах, когда величина $\frac{1}{A}\ell^{\Delta Э / KT}$ становится много больше единицы, функция распределения Ферми–Дирака переходит в классическую $W_Э = A \cdot \ell^{\ \Delta Э / KT}$.

Если оценить температуру, называемую температурой вырождения, выше которой ($T > T_{выр}$) для электронов в металле можно пользоваться классической статистикой, то получается, что эта температура, например, для серебра, близка к 50 000 °С. Это означает, что при всех температурах, при которых металлы вообще могут существовать в твердом состоянии, электроны в них следует рассматривать как «вырожденный» газ, когда справедлива статистика Ферми–Дирака.

Большое значение температуры вырождения связано с малой массой электрона. Для ионов и молекул, масса которых в тысячи раз больше массы электрона, вполне применима классическая статистика при обычных температурах.

Современные представления о механизмах проводимости твердых тел основываются на зонной теории, которая является одним из разделов квантовой теории. Она описывает движение электронов в кристаллах и является основой современной теории металлов, полупроводников и диэлектриков.

Согласно зонной теории в твердом теле энергетическое состояние электронов определяется не только их взаимодействием с ядром своего атома, но и электрическим полем кристаллической решетки, т.е. взаимодействием с другими атомами.

Из-за влияния поля кристаллической решетки в твердом теле уровни энергии электронов несколько смещаются по сравнению с их расположением в уединенных атомах, а также снижаются (размываются) потенциальные барьеры между электронами (рис. 3). Происходит так называемое «обменное взаимодействие», о котором упоминалось при рассмотрении ковалентной химической связи. В результате обменного взаимодействия происходит перекрытие электронных оболочек в атомах кристалла и «обобществление» электронов, которые становятся общими для всего кристалла, а не принадлежат одному определенному атому. Уровни разрешенных значений энергии электронов при этом расщепляются в зоны с множеством разрешенных энергетических уровней, называемых разрешенными зонами. Количество уровней в зоне определяется количеством атомов в кристалле, а численные значения разрешенных энергией в зоне отличаются весьма незначительно. Так, в 1 $см^3$ твердого тела находится $10^{22}...10^{23}$ атомов. Такой же порядок имеет и число уровней в зоне. Расстояние между соседними уровнями в зоне составляет приблизительно 10^{-22} эВ.

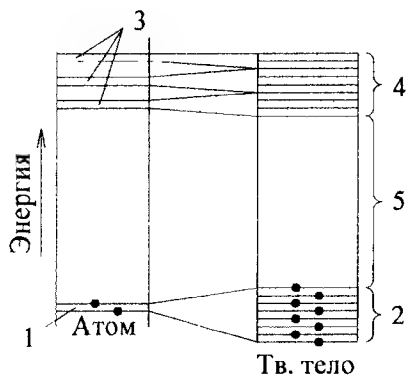


Рис. 3. Схема расположения энергетических уровней уединенного атома и неметаллического твердого тела: *1* – нормальный энергетический уровень атома; *2* – заполненная электронами зона; *3* – уровни возбужденного состояния атома; *4* – свободная зона; *5* – запрещенная зона

Однако обменное взаимодействие и связанное с ним расщепление уровней электронов сильнее всего сказывается на энергетических

уровнях внешних (валентных) электронов атомов. Наоборот, энергетические уровни внутренних электронов либо совсем не расщепляются, либо расщепляются очень слабо.

В твердом теле разрешенные энергетические зоны разделены зонами запрещенных значений энергии – запрещенными зонами.

С точки зрения зонной теории твердого тела различия в электрических свойствах разных типов твердых тел объясняются:

а) различным заполнением валентными электронами разрешенных энергетических зон;

б) шириной запрещенных энергетических зон (рис. 4).

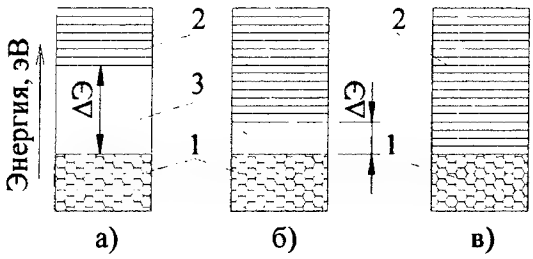


Рис. 4. Энергетическое отличие диэлектриков (а) от полупроводников (б) и металлических проводников (в): *1* – заполненная электронами зона; *2* – зона свободных энергетических уровней; *3* – запрещенная зона шириной ΔЭ

Необходимым условием проводимости твердого тела является наличие свободных энергетических уровней, на которые электрическое поле могло бы перевести электроны. Если валентные (коллективизированные) электроны образуют валентную зону кристалла, заполненную неполностью, то электроны, расположенные в этой зоне кристалла, под действием электрического поля будут переходить на верхние свободные энергетические уровни, имеющиеся в валентной зоне, и такое тело будет проводником электрического тока. При образовании кристаллического твердого тела иногда на валентную зону кристалла накладывается зона, расположенная выше, и образуется более широкая гибридная зона, в которой размещаются валентные электроны. Электроны заполняют гибридную зону лишь частично, и подобные кристаллы также являются проводниками.

У диэлектриков энергетические зоны не перекрываются, причем зона, объединяющая внешние электроны атомов или ионов, целиком заполнена электронами, а все более высокие зоны при $T = 0$ К совершенно пусты. Поэтому для осуществления проводимости требуется перевести электрон из нижней заполненной энергетической зоны в верхнюю свободную, для чего необходимо затратить энергию, равную ширине запрещенной зоны, энергию активации, равную нескольким электрон-вольтам.

Энергия, приобретаемая электроном в металле под действием электрического поля на длине свободного пробега, составляет $10^{-4}...10^{-8}$ эВ и ее вполне достаточно для внутризонных переходов. Средняя энергия тепловых колебаний атомов твердого тела при комнатной температуре составляет приблизительно 0,05 эВ. Ее также достаточно для переходов электронов внутри разрешенной зоны. Однако при обычных разностях потенциалов, приложенных к кристаллу, энергия, получаемая электроном на длине свободного пробега, совершенно недостаточна для переброса электрона в следующую разрешенную зону. Поэтому диэлектриком будет такое тело, у которого запрещенная зона настолько велика, что электронной электропроводности в обычных условиях не наблюдается.

Полупроводниками будут вещества с более узкой запрещенной зоной (0,1...5 эВ), которая может быть преодолена за счет внешних энергетических воздействий.

При отсутствии в полупроводнике свободных электронов ($T = 0$ К) приложенная к нему разность электрических потенциалов не вызовет тока. Если извне будет подведена энергия, например, повышена температура, достаточная для переброса электронов через запрещенную зону, то, став свободными, электроны смогут перемещаться и под действием электрического поля создавать электронную электропроводность полупроводника.

В заполненной зоне, откуда ушел электрон, образовалась «электронная дырка», а потому в полупроводнике начнется движение электронов, заполняющих образовавшуюся дырку, причем дырка будет двигаться в направлении поля как положительный заряд.

Следует отметить, что исходя из зонной теории между кристаллическими полупроводниками и диэлектриками принципиального различия нет, а есть лишь количественные. При $T = 0$ те и другие имеют проводимость, равную нулю.

Обращение проводимости в нуль при абсолютном нуле есть характерное свойство полупроводников и диэлектриков, в то время как металл можно определить как вещество, проводимость которого при $T = 0$ не обращается в нуль (обычно даже является максимальной). Таким образом, с физической точки зрения полупроводник отличается от металла не меньшей величиной проводимости при обычных температурах, а тем, что проводимость полупроводников при $T = 0$ обращается в нуль.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДИЭЛЕКТРИКАХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

2.1. Поляризация диэлектриков

Термин «диэлектрики» (от греч. *dia* – через и англ. *electric* – электрический) введен Фарадеем для обозначения веществ, через которые проникает электростатическое поле (в отличие от металлов, экранирующих электростатическое поле). *Диэлектрики* – вещества, плохо проводящие электрический ток, и поэтому применяются в качестве изоляционных материалов. Их удельное сопротивление $10^8 \ldots 10^{18}$ Ом·м. Однако *основным свойством диэлектрика является его способность к поляризации.*

Под действием внешнего электрического поля заряды, входящие в каждую молекулу, смещаются в пределах этой молекулы в противоположных направлениях, в результате чего в каждом элементе появляется дипольный момент $p = q \cdot l$, отличный от нуля. Таким образом, *поляризация* – это ограниченное смещение связанных зарядов диэлектрика под действием электрического поля.

Поляризация приводит к появлению дипольного момента у всего объема диэлектрика. Количественной характеристикой поляризации является поляризованность, или вектор поляризации $\bar{\rho}$, который равен сумме электрических дипольных моментов всех молекул единицы объема вещества:

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i}^{N} \rho i}{V}, \quad \frac{\text{Кл} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} = \text{Кл} \cdot \text{м}^{-2}.$$

В некоторых случаях поляризация может возникать под действием механических напряжений (в пьезоэлектриках), а в сегнетоэлектриках самопроизводственная (спонтанная) поляризация существует и в отсутствии электрического поля.

В результате поляризации на поверхности диэлектрика появляются связанные электрические заряды противоположных знаков. Внутри диэлектрика появляется внутреннее электрическое поле, направленное противоположно внешнему и ослабляющее его (рис. 5):

$$E_{рез} = E_{внеш} - E_{внутр}.$$

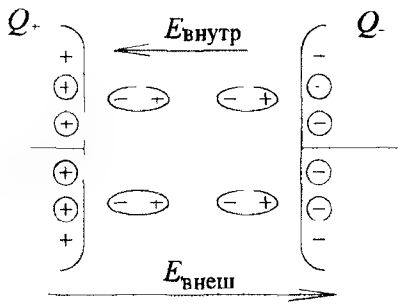


Рис. 5

Чем больше поляризованность ρ, тем больше не скомпенсированных зарядов появится на поверхности диэлектрика. $Q = Q_o$ – без диэлектрика;

$$Q_{диэл} = Q_o + Q_{доп},$$

тогда $$\frac{Q_{диэл}}{Q_o} = \frac{Q_o + Q_{доп}}{Q_o} \geq 1; \quad \frac{Q_{диэл}}{Q_o} = \varepsilon,$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость вещества. Она показывает во сколько раз заряд при наличии диэлектрика больше заряда при наличии между противоположно заряженными плоскостями вакуума. Поскольку $Q = CU$, то можно записать, что $\frac{C_{диэл}}{C_o} = \varepsilon$, т.е. величина ε характеризует способность различных

диэлектриков образовывать емкость в электрическом поле. Чем больше величина ε, тем больше емкость конденсатора при прочих равных условиях.

C_o – емкость в вакууме;

$\varepsilon_{абс} = \varepsilon_o \varepsilon$;

$\varepsilon_{абс}$ – зависит от системы единиц;

$\varepsilon_o = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная.

ε не зависит от выбора системы единиц и как универсальный параметр используется для характеристики диэлектриков.

Диэлектрик в зависимости от его строения и вида химической связи может обладать одним или несколькими видами поляризации.

Виды поляризации

Все виды поляризации делятся на 2 группы:

1) поляризация происходит практически мгновенно без рассеяния энергии при всех частотах воздействия напряжения;

2) медленные виды поляризации, сопровождаемые рассеянием энергии (потерями), в результате которых диэлектрик нагревается.

К первой группе относятся:

1. Электронная поляризация – упругая деформация электронных оболочек атомов или ионов под действием электрического поля. Она наблюдается у всех без исключения диэлектриков, но является основным видом поляризации у неполярных диэлектриков. Электронная поляризация происходит на всех частотах, вплоть до 10^{+15} Гц и не сопровождается потерями энергии. Диэлектрики с преимущественно этим видом поляризации – это газы (практически большинство), органические неполярные материалы – полиэтилен, фторопласт-4, полистирол.

2. Ионная поляризация – смещение ионов под действием электрического поля в пределах кристаллической решетки. Этот вид поляризации тоже протекает мгновенно, вплоть до частот $10^{+12}...10^{+13}$ Гц без потерь энергии. Характерна ионная поляризация для ионных кристаллов.

Ко второй группе относятся ориентационные виды поляризации это замедленные виды поляризации, происходящие с рассеянием энергии, в результате чего диэлектрик нагревается.

1. Дипольно-релаксационная поляризация – это ориентация диполей в полярных жидкостях. В твердых полярных диэлектриках эта поляризация называется дипольно-радикальной, поскольку под действием электрического поля поворачивается не вся молекула, а только имеющиеся в ней полярные радикалы. Она находится в значительной зависимости от температуры, вязкости материала и частоты приложенного напряжения. С увеличением температуры молекулярные силы и вязкость уменьшаются, что усиливает возможность ориентации диполей. В то же время возрастает энергия теплового движения, что уменьшает ориентирующее влияние поля. Поэтому температурное изменение диэлектрической проницаемости характеризуется наличием максимума. В переменных полях высокой частоты диполи (в полярных жидкостях) или радикалы (в твердых полярных диэлектриках) не успевают ориентироваться с частотой поля, и поляризация уменьшается с увеличением частоты приложенного напряжения.

2. Электронно-релаксационная и ионно-релаксационная поляризация – смещение слабо связанных, дефектных электронов или ионов. Под действием электрического поля такие частицы могут получать среди теплового хаотического движения избыточные перебросы в направлении поля на значительные расстояния, что вносит заметный вклад в значение ε. При этой поляризации возникает рассеяние энергии поля. Время ее установления $10^{-3}...10^{-6}$ с.

3. Структурная (миграционная) поляризация. Этот вид поляризации заключается в смещении и накоплении зарядов на границах неоднородностей структуры диэлектриков. Заряды могут перемещаться только в пределах каждого включения, которое становится подобным огромной поляризованной молекуле. Процесс поляризации протекает медленно (секунды) и сопровождается значительным нагревом, т.е. потерями энергии.

4. Самопроизвольная (спонтанная) поляризация существует только у группы диэлектриков, имеющих доменную структуру, – сегнетоэлектриков. Домены – самопроизвольно поляризованные области. В отсутствии внешнего электрического поля дипольные моменты доменов ориентированы хаотически, так что общий $\bar{\rho} - 0$. При наложении поля дипольные моменты ориентируются, что создает эффект очень сильной поляризации. Величина ε сегнетоэлектриков нелинейна и достигает десятков тысяч. Вектор поляризации $\bar{\rho}$

нелинейно зависит от напряженности поля E. Эта поляризация сопровождается рассеянием энергии поля и существует до определенной температуры и частоты.

Поляризация – обратимый процесс. После снятия электрического поля ориентация частиц ослабевает, и опять дипольные моменты ориентируются хаотически (из-за теплового движения) так, что поляризованность вещества $\bar{\rho} = 0$.

Математически это выражается формулой, отражающей зависимость дипольно-релаксационных видов поляризации от времени:

$$P_{ДР}(t) = P_{ДР}(0)\exp.(t_0),$$

где t – время прошедшее после снятия поля;

t_0 – постоянная времени (время релаксации). Таким образом, время релаксации – это промежуток времени, в течение которого ориентированность диполей после снятия поля уменьшается вследствие наличия теплового движения в 2,7 раза от первоначального значения, т.е. система из неравновесного состояния приближается к равновесному.

Эквивалентную схему диэлектрика, в котором существуют все виды поляризации, можно представить в виде ряда параллельно подключенных к источнику напряжения U конденсаторов и резисторов (рис. 6):

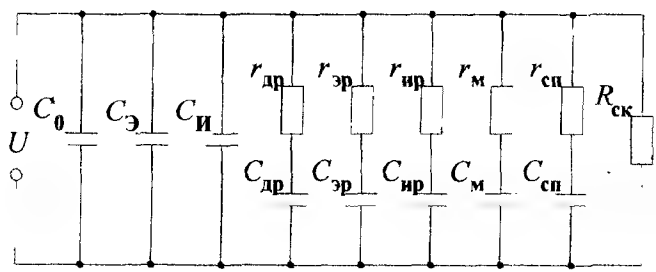


Рис. 6. Эквивалентная схема диэлектрика сложного состава с различными механизмами поляризации:
C_0 – емкость, обусловленная геометрическими размерами (емкость в вакууме); все остальные значения C соответствуют различным видам поляризации: электронной ($C_э$), ионной ($C_и$), дипольно-релаксационной ($C_{др}$), электронно-релаксационной ($C_{эр}$), ионно-релаксационной ($C_{ир}$), миграционной ($C_м$), спонтанной ($C_{сп}$); r – сопротивления, эквивалентные потерям энергии при этих видах поляризации; $R_{ск}$ – сопротивление диэлектрика току сквозной проводимости

Температурная зависимость ε характеризуется выражением

$$\text{ТК}_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon}\cdot\frac{d\varepsilon}{dT}\left[K^{-1}\right] \approx -2\cdot 10^{-6}\text{K}^{-1}.$$

Уменьшение ε при увеличении температуры газа связано с уменьшением плотности.

Диэлектрическая проницаемость жидкостей

Величина ε неполярных жидкостей невелика и обусловлена электронной поляризацией (ε = 2,0...2,5). Зависимость ε от температуры носит падающий характер (рис. 10), что как и для газов связано с уменьшением плотности. $\text{ТК}_\varepsilon < 0$ – для неполярных жидкостей. Для жидкостей, состоящих из полярных молекул, основной вклад в значение ε, вносит дипольно-релаксационная поляризация, поэтому величина ε высока (ε ≈ 4...13), а у воды, например, ε = 80. Зависимость от температуры имеет максимум. На участке *ав* (рис. 11) ε растет за счет облегчения поворота диполей в связи с уменьшением вязкости. На участке *вс* ε падает из-за уменьшения плотности в связи с ростом температуры, как и у неполярных жидкостей.

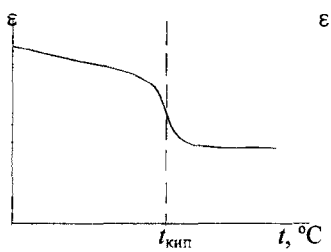


Рис. 10. Зависимость диэлектрической проницаемости неполярной жидкости от температуры

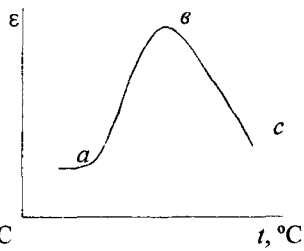


Рис. 11. Зависимость диэлектрической проницаемости полярной жидкости от температуры

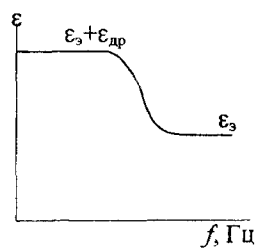


Рис. 12. Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты

Есть зависимость ε и от частоты приложенного напряжения (рис. 12). При увеличении частоты диполи не успевают ориентироваться с частотой поля, и поэтому вклад в величину ε дипольно-

релаксационной поляризации идет на убыль и на высоких частотах ε обусловлена только электронным видом поляризации.

Эти нелинейные свойства полярных жидкостей затрудняют их использование в качестве пропитывающих материалов для конденсаторов.

Сильно полярные жидкости с величиной ε ≈ 80...90, такие как вода, этиловый спирт, вообще не применяются в качестве диэлектриков вследствие их большой электропроводности.

Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков

В твердых телах в зависимости от их структурных особенностей возможны все виды поляризации. Поэтому величина ε, а также влияние на нее температуры и частоты приложенного напряжения определяются строением и видом химической связи.

Для неполярных твердых диэлектриков ε находится в пределах ε ≈ 2,0...4,5. Частотная и температурная зависимость имеют такой же характер, как и для неполярной жидкости. Однако ТКε ионных кристаллов в большинстве случаев имеет положительное значение вследствие того, что при повышении температуры не только уменьшается плотность вещества, но и возрастает поляризуемость ионов $\alpha_и$, причем влияние этого фактора сказывается на величине ε сильнее, чем уменьшение плотности. Величина ε для ионных кристаллов лежит в широких пределах – ε ≈ 4...100.

Диэлектрическая проницаемость полярных твердых диэлектриков в большей степени зависит от температуры и частоты приложенного напряжения, подчиняясь тем же закономерностям, какие наблюдаются для дипольных жидкостей, ε ≈ 4,5...8,0 (табл. 2).

Таблица 2

Неполярный диэлектрик		Дипольный диэлектрик	
ε твердых диэлектриков			
Парафин	1,9–2,2	Бакелит	4,5
Полистирол	2,4–2,6	Поливинилхлорид	3,4
Сера	3,6–4,0	Целлюлоза	6,5
Алмаз	5,6–5,8	Эпоксидные полимеры	3,8

Для сегнетоэлектриков ε велика и имеет резкую зависимость от напряженности электрического поля и температуры ε ≈ 1000...100000. Температура, при которой ε имеет максимум, называется точкой Кюри. В области температур выше точки Кюри сегнетоэлектрические свойства материала исчезают (рис. 13 *а*, *б*).

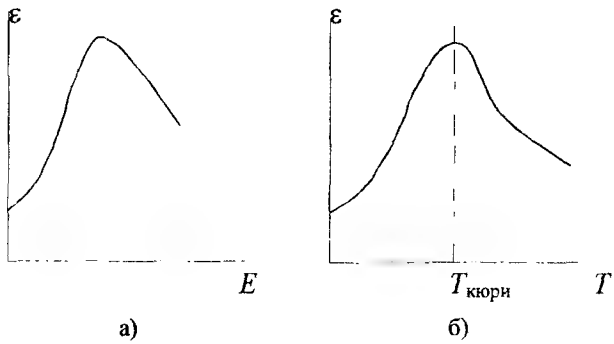


Рис. 13. Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от: *а* – напряженности электрического поля; *б* – температуры

Для сегнетоэлектриков характерно явление диэлектрического гистерезиса (запаздывания) (рис. 14).

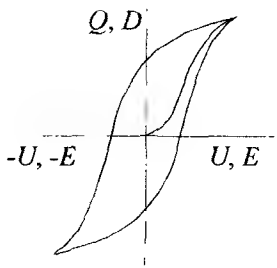


Рис. 14. Зависимость заряда конденсатора от напряжения для сегнетоэлектриков (по осям абсцисс отложены U и $E = U/h$, по осям ординат Q, $D = Q/S$)

Сегнетоэлектрики на основе титаната бария $BaTiO_3$, у которого точка Кюри около 133 °С, а ε = 6000...7000, применяются для изготовления малогабаритных конденсаторов большой емкости.

Для изготовления высокочастотных конденсаторов предпочитают неполярные диэлектрики со стабильным значением ε от частоты и без потерь энергии.

Для изготовления электрических изоляторов лучше применять материалы с возможно малой величиной ε, так как при этом улучшаются их электрические характеристики, в частности, возрастает напряжение «перекрытия» поверхностного пробоя.

Диэлектрики с низким значением ε используют для изготовления корпусов и подложек микросхем, чтобы при высоких частотах, на которых работают микросхемы, не «шунтировался» входной сигнал из-за уменьшения емкостного сопротивления $X_c = \frac{1}{\omega c}$, возникающего между близко расположенными выводами микросхем.

2.3. Электропроводность и токи диэлектриков

В любом реальном (техническом) диэлектрике находится некоторое количество свободных зарядов примесей. При приложении к диэлектрику напряжения направленное перемещение этих свободных зарядов обусловливает ток в диэлектрике. Этот ток называется *сквозным током* $I_{скв}$. Сквозной ток в большинстве диэлектриков имеет ионный характер в отличие от электронного в металлах. При невысоких напряжениях в диэлектриках выполняется закон Ома. Это говорит о том, что ток обусловлен примесями и число их не зависит от напряженности поля E.

Процессы поляризации в диэлектрике тоже аналогичны току, но эти токи обусловлены перемещением связанных зарядов и существует только короткое время, пока процесс поляризации не завершился. Они называются *токами смещения*. Электронная и ионная поляризации устанавливаются мгновенно и токи смещения, обусловленные этими видами поляризации, настолько кратковременны, что их невозможно зафиксировать прибором – гальванометром. Замедленные виды поляризации – релаксационные – устанавливаются более длительное время и токи смещения, обусловленные ими, уже воспринимаются регистрирующими приборами до тех пор, пока эти виды поляризации не завершатся.

Токи смещения замедленных видов поляризации называются *абсорбционными токами* (или токами абсорбции) $I_{абс}$.

Таким, образом, зависимость тока в диэлектрике от времени при постоянном напряжении будет иметь вид (рис. 15).

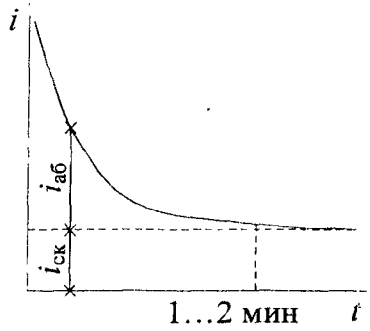


Рис. 15. Зависимость тока через диэлектрик от времени

Общий ток, протекающий через диэлектрик, равный сумме токов абсорбции и сквозного тока, называется *током утечки*:

$$I_{ут} = I_{абс} + I_{скв}.$$

Сопротивление диэлектрика при постоянном напряжении (омическое сопротивление) вычисляют по формуле

$$R = \frac{U}{I_{ут} - \sum I_{абс}},$$

при установившемся токе, т.е. при сквозном, исключая поляризационные токи.

При переменном напряжении токи абсорбции будут существовать в диэлектрике все время действия напряжения. При повышении частоты приложенного напряжения не все виды замедленной поляризации будут успевать устанавливаться, поэтому сопротивление диэлектрика станет существенно зависеть от частоты внешнего поля, а не будет параметром, характеризующим структуру изоляционного материала.

Для сравнительной оценки электропроводности различных материалов в справочной литературе используют величины удельного объемного (ρ_v) и удельного поверхностного (ρ_s) сопротивлений.

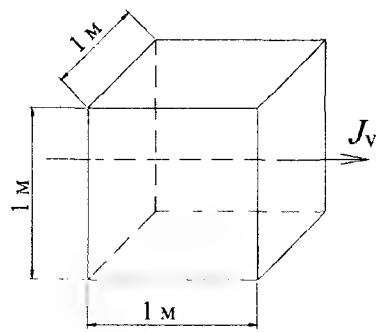


Рис. 16

Удельное объемное сопротивление (ρ_v) численно равно сопротивлению куба с ребром 1 м, мысленно вырезанного из исследуемого материала, если ток проходит перпендикулярно противоположным граням этого куба (рис. 16):

$$\rho_v = R_v \frac{s}{h}, \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Удельное поверхностное сопротивление ρ_s численно равно сопротивлению квадрата плоской поверхности материала, если ток проходит между двумя противоположными сторонами этого квадрата (рис. 17):

$$\rho_s = R_s \frac{d}{\ell}, \text{ Ом},$$

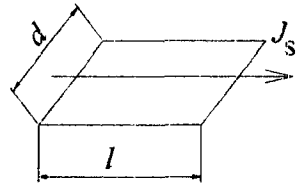


Рис. 17

где d – ширина электродов;

ℓ – расстояние между ними.

Сопротивление изоляции $R_{из}$ равно отношению напряжения приложенного к образцу, к общему току, протекающему через образец, т.е. $R_{из}$ равно сопротивлению параллельно включенных R_v и R_s диэлектрика: $R_{из} = R_v \parallel R_s$.

Для газообразных и жидких диэлектриков поверхностное сопротивление обычно не рассчитывается. Величина удельного объемного сопротивления диэлектриков при нормальных температурах находится в пределах

$$\rho_v = 10^8 \ldots 10^{18} \text{ Ом·м}.$$

Электропроводность диэлектриков зависит от их агрегатного состояния, а также от температуры и влажности.

2.3.1. Электропроводность газов

Газы при небольших напряженностях электрического поля имеют очень малую электропроводность ρ_v газов $\approx 10^{18}$ Ом·м. Ток в газах в основном вызван свободными электронами, которые всегда имеются в газах (например, в воздухе) в результате внешних ионизаторов: световые кванты, α-, β-, γ-частицы и т.д. Зависимость тока от напряжения для газа приведена на рис. 18. На участке ОА – выполняется закон Ома: число электронов и ионов не зависит от U и обусловлено внешними ионизаторами; наряду с ионизацией происходит рекомбинация, благодаря чему концентрация носителей тока не увеличивается. Участок АВ

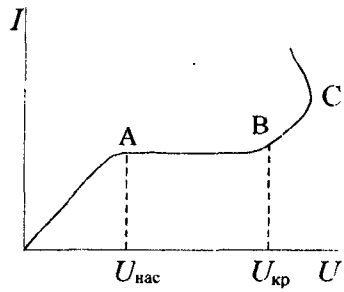


Рис. 18. Зависимость тока в газе от напряжения

соответствует насыщению, когда все свободные частицы, создаваемые в газовом промежутке, долетают до электродов. Для воздуха ток насыщения (~10^{-15}А) при расстоянии между электродами 1 см наблюдается при напряженностях поля ~ 0,6 В/м; сопротивление может возрасти на участке насыщения на 5–6 порядков! На участке ВС (при U выше $U_{КР}$) начинается ударная ионизация – соударения электронов с молекулами газа, из-за чего происходит ионизация газа – выбивание электронов из молекул газа. В результате ударной ионизации лавинообразно увеличивается количество носителей тока (электронов и ионов) и возможен пробой газового промежутка – потеря его диэлектрических свойств.

2.3.2. Электропроводность жидкостей

Проводимость жидкостей обусловлена строением их молекул и чистотой самой жидкости. Причиной проводимости неполярных жидкостей является наличие ионов примесей, например, влаги.

У полярных жидкостей проводимость может быть обусловлена не только ионами примесей, но и ионами самой жидкости, образованными в результате диссоциации полярных молекул. Поэтому полярные жидкости имеют повышенную проводимость по сравнению с неполярными. В жидкостях, представляющих из себя коллоидные системы (эмульсии, суспензии – лаки, компаунды, клеи), наблюдается молионная проводимость, когда носителями тока являются не отдельные ионы, а более крупные образования заряженных частиц - молионы, при этом наблюдается явление электрофореза.

При сильных электрических полях ($E \approx 10$ МВ/м) в жидкостях возникает электронная проводимость за счет эмиссии электронов с поверхности электродов или образованных в жидкости вследствие ионизационных процессов. Электроны не могут длительное время существовать в жидкости в свободном состоянии, поэтому образуют электроотрицательные ионы или захватываются положительными ⊕ ловушками. В результате возникает перескоковый механизм движения электронов в жидкости: $\bar{\ell}$ → ловушка → снова $\bar{\ell}$ → ловушка.

Значение удельного сопротивления неполярных жидкостей – $\rho_v = 10^{13}...10^{11}$ Ом·м; для полярных – $10^{10}...10^{8}$ Ом·м.

Сильнополярные жидкости отличаются настолько низким сопротивлением, что являются уже проводниками с ионной проводимостью (табл. 3).

Таблица 3

Удельное объемное сопротивление и диэлектрическая проницаемость некоторых жидкостей при температуре 20 °С

Жидкость	Особенности строения	ρ, Ом·м	ε
Бензол	Неполярная	$10^{11}...10^{12}$	2,2
Трансформаторное масло		$10^{10}...10^{13}$	2,3
Бензин			2,0
Совол	Полярная	$10^{8}...10^{10}$	4,5
Касторовое масло			4,6
Ацетон	Сильнополярная	$10^{4}...10^{5}$	22,0
Этиловый спирт			33,0
Дистиллированная вода		$10^{3}...10^{4}$	81,0

Для водопроводной воды $\rho_v = 100$ Ом·м.

Удельное сопротивление любой жидкости значительно зависит от температуры. С увеличением температуры оно уменьшается по двум причинам:

1) возрастает подвижность ионов в связи с уменьшением вязкости;

2) увеличивается степень тепловой диссоциации молекул жидкости.

Для жидких диэлектриков выполняется закон:

$$\gamma \cdot \eta = \text{const},$$

где $\gamma = \frac{1}{\rho}$ – проводимость; η – динамическая вязкость.

В большинстве случаев температурная зависимость удельного сопротивления жидкости диэлектриков может быть выражена формулой

$$\rho = \rho_0 \exp(-\alpha t),$$

где $ТК_\rho = -\alpha$.

При длительной выдержке жидкости при постоянном напряжении может наблюдаться электроочистка – ионы осаждаются на электродах и сопротивление увеличивается.

2.3.3. Электропроводность твердых диэлектриков

Вид электропроводности твердых диэлектриков существенно зависит от их структурного строения и может быть обусловлен как ионами примесей, так и ионами самого диэлектрика, а в некоторых диэлектриках наблюдается электронная проводимость.

Устанавливают вид электропроводности экспериментально. Ионная проводимость сопровождается переносом вещества на электроды (закон Фарадея). При электронной проводимости это явление не наблюдается.

Для твердых диэлектриков различают объемную и поверхностную проводимость и соответственно величины объемного (R_v) и поверхностного сопротивлений (R_s):

$$R_v = \rho_v \frac{\ell}{S};$$

отсюда

$$\rho_v = R_v \frac{S}{\ell}, \text{ Ом·м},$$

и

$$R_s = \rho_s \frac{\ell}{d};$$

$$\rho_s = R_s \frac{d}{\ell}, \text{ Ом}.$$

R_v и R_s включены параллельно, поэтому

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_v \cdot R_s}{R_v + R_s}.$$

Для твердых диэлектриков величина удельного объемного сопротивления лежит в широких пределах $\rho_v = 10^{16}...10^{8}$ Ом·м и на величину ρ_v оказывает влияние:

1. Температура:

$$\rho_v = \rho_o \exp(-\alpha t),$$

где $ТК_\rho = -\alpha$. Если в диэлектрике ток обусловлен движением разнородных ионов, то в зависимости $\ln\rho = f(T)$, появляются изломы (рис. 19, 20).

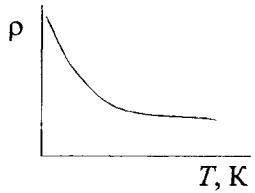


Рис. 19

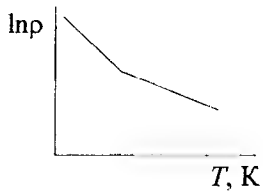


Рис. 20

2. Структурное строение. В неполярных диэлектриках молекулярного строения сопротивление велико и определяется наличием ионов или электронов примесей.

В кристаллических диэлектриках, содержащих ионы одновалентных металлов, проводимость выше, чем в кристаллах с многовалентными ионами. В кристалле *N*aCE ионная проводимость осуществляется ионами хлора, которые имеют меньшую энергию активации. А в керамике, содержащей крупные двух-, трех-, четырехвалентные ионы, наблюдается электронная проводимость.

3. Пористость материала. Значительно увеличивается проводимость с ростом гигроскопичности и влагопроницаемости материала

Пояснение: Гигроскопичность – способность впитывать в себя влагу из окружающей среды. Она определяется по увеличению массы увлажняемого образца.

Влагопроницаемость – способность пропускать сквозь себя пары воды. Измеряется в секундах.

Для увеличения сопротивления пористые материалы подвергают сушке (зависимость удельного сопротивления ρ от температуры сушки представлена на рис. 21, где t_0 – начальная температура сушки; t_1 – конечная температура), а затем пропитке лаками и смолами.

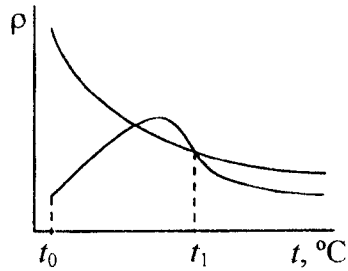


Рис. 21

Удельное поверхностное сопротивление ρ_s зависит от состояния поверхности материала (у чистой, полированной поверхности ρ_s выше), а также от смачиваемости материалов (рис. 22).

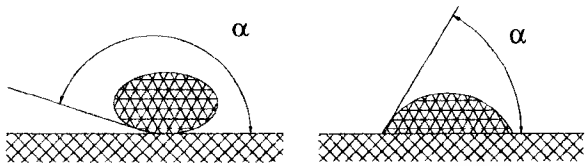


Рис. 22

Для уменьшения смачиваемости поверхность диэлектриков покрывают лаками, глазурями.

При увеличении температуры ρ_s возрастает из-за испарения влаги с поверхности диэлектрика.

2.3.4. Измерение объемного (R_v) и поверхностного (R_s) сопротивлений диэлектриков

Измерение сопротивлений диэлектриков обычно производят при нормальных атмосферных условиях и постоянном напряжении от 1 до 500 В. В качестве регистрирующих приборов применяют высокочувствительные электронные гальванометры, мегаомметры, тераомметры или мосты постоянного тока.

Сопротивление газообразных диэлектриков, в том числе воздуха, не поддается измерению регистрирующими приборами из-за высоких значений сопротивления газов. Поэтому величины сопротивлений газа получены расчетным путем исходя из данных о составе газа, величине его атомов, количестве атомов в единице объема и т.д.

Определение сопротивлений жидких и твердых диэлектриков производят на плоских (от 25 до 150 мм) или трубчатых образцах (от 100 до 300 мм). Толщина образцов берется от 0,5 до 2 мм.

Электроды должны обладать высокой проводимостью, обеспечивать плотный электрический контакт по всей поверхности и не вступать в химические реакции с образцом. В качестве электродов применяются: металлические нажимные электроды из нержавеющих сортов стали; электроды из отожженной алюминиевой или оловянной фольги, притертой тонким слоем конденсаторного или трансформаторного масла; графитовые электроды: электроды из осажденных в вакууме металлов или паст – серебра, платины, меди, цинка; электроды из токопроводящей резины (сопротивление слоя резины должно быть не более 100 Ом). Сопротивление изоляции ($R_{из}$) может уменьшаться с повышением приложенного к ней напряжения, что может быть вызвано образованием в изоляции объемных электрических зарядов, изменением под действием электрического поля формы и размеров включенной влаги, ионизацией газовых включений и др. Поэтому сопротивление изоляции электрической машины, кабеля, конденсатора и других по возможности должно измеряться при напряжении не ниже рабочего.

С измерением сопротивлений диэлектриков подробней познакомимся на лабораторных работах.

2.4. Диэлектрические потери

Диэлектрическими потерями называется электрическая мощность P, затрачиваемая на нагрев диэлектрика, находящегося в электрическом поле.

Потери энергии в диэлектрике наблюдаются как при переменном, так и при постоянном напряжении. При постоянном напряжении потери вызываются сквозными токами, поэтому качество материала может характеризоваться значениями ρ_v и ρ_s, которые определяют сопротивление изоляции $R_{из}$.

$$P = \frac{U^2}{R_{из}} = I_a^2 R_{из} = I_a U_a, \text{ Вт};$$

$$\rho = \frac{P}{V} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3} \text{ – удельные потери.}$$

При переменном напряжении в диэлектрике, кроме сквозных токов, протекают токи абсорбции, которые вызывают дополнительный нагрев изоляции. Итак, при переменном напряжении потери энергии больше!

В инженерной практике для оценки потерь в диэлектрике при переменном напряжении используют величину tgδ – тангенс угла диэлектрических потерь. Углом диэлектрических потерь δ называется угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между током и напряжением в емкостной цепи (рис. 23).

Для изучения поведения диэлектрика с потерями при переменном напряжении используют схему замещения, в которой диэлектрик представлен конденсаторами без потерь, а активная мощность, рассеиваемая в диэлектрике, представлена резисторами (*R* или *r*), включенными последовательно или параллельно конденсатору (рис. 24).

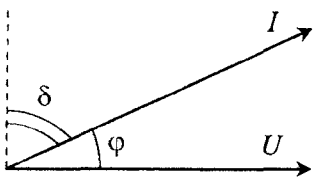


Рис. 23

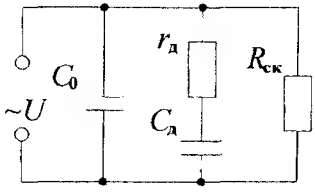


Рис. 24

Схема замещения обычно анализируется, разделяя последовательную и параллельную цепочки. При этом параллельная схема замещения справедлива, если потери преимущественно вызваны токами сквозной проводимости, т.е. для неполярных диэлектриков, в которых отсутствуют релаксационные виды поляризации. Когда же основную роль играют потери, вызванные токами абсорбции, т.е. для полярных диэлектриков, то применяют последовательную схему замещения.

Получим выражения для tgδ и мощности диэлектрических потерь P в том и другом случае.

Параллельная схема замещения (рис. 25):

$$\delta = 90 - \varphi; \qquad \operatorname{tg}\delta = \frac{I_a}{I_c},$$

где $I_a = U/R$; $I_c = U\omega C$; тогда $\operatorname{tg}\delta = 1/R\omega C$, а активная мощность – потери в диэлектрике

$$\rho = \frac{U^2}{R} = U^2 \mathrm{tg}\delta \cdot \omega \cdot C\ .$$

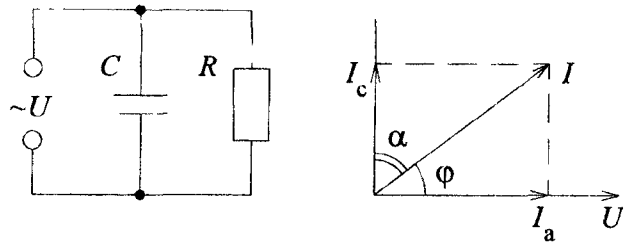


Рис. 25

Последовательная схема замещения (рис. 26):

$$\mathrm{tg}\delta = \frac{U_a}{U_c} = \frac{I \cdot r}{I \cdot X_c} = r\omega C.$$

Рассчитаем мощность потерь для последовательной схемы:
$P = I^2 r$; заменяя $I^2 = U^2/Z^2$; $Z^2 = X_c^2 + r^2$ и $\mathrm{tg}\delta = r \cdot \omega C$, получим

$$P = \frac{U^2 r}{X_c^{\,2} + r^2} = \frac{U^2 \cdot r}{X_c \cdot X_c (1 + r^2 / X_c^{\,2})} = \frac{U^2 \mathrm{tg}\delta \cdot \omega \cdot C}{1 + \mathrm{tg}^2\delta}\ .$$

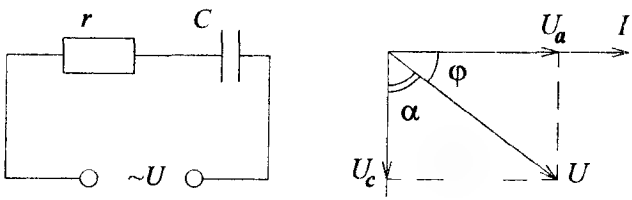


Рис. 26

Величина $\mathrm{tg}\delta$ для полярных диэлектриков не превышает 0,03, значит, $\mathrm{tg}\delta^2 << 1 \approx 0{,}001$. Пренебрегаем этой величиной по сравнению с единицей. Тогда формулы для вычисления потерь, полученные для параллельной и последовательной схем замещения, совпадают:

$$P = U^2 \mathrm{tg}\delta \cdot \omega C.$$

Однако численные значения емкости конденсаторов и сопротивления резисторов R и r в параллельной и последовательной схемах различны. Их можно найти, приравняв выражения для tgδ и P для параллельной и последовательной схем.

Диэлектрические потери имеют важное значение для материалов, используемых в установках высокого напряжения, в высокочастотной аппаратуре и особенно в высоковольтных, высокочастотных устройствах, поскольку значение диэлектрических потерь пропорционально квадрату приложенного к диэлектрику напряжения и частоте. Большие диэлектрические потери в электроизоляционном материале вызывают сильный нагрев изготовленного из него изделия и могут привести к его тепловому разрушению. Поэтому материалы, предназначенные для работы при высоких напряжениях и высоких частотах, должны отличаться малыми значениями угла потерь и диэлектрической проницаемости.

Наименьшее значение tgδ имеют неполярные диэлектрики ($\mathrm{tg}\delta \approx 2 \cdot 10^{-4}$); у полярных диэлектриков tgδ достигает значений $10^{-3}...10^{-2}$. Тангенс угла диэлектрических потерь не зависит от размеров изделия, поэтому он является характеристикой материала и приводится в справочной литературе; tgδ является характеристикой, измеряемой только при переменном напряжении.

2.4.1. Диэлектрические потери в газах

Источником диэлектрических потерь в газах может быть в основном только электропроводность, поскольку ориентационные виды поляризации в газах весьма незначительны. Электропроводность газов также весьма мала ($\rho \approx 10^{18}$ Ом·м), поэтому диэлектрические потери их незначительны. tgδ газов можно вычислить, используя формулу для параллельной схемы замещения: $\mathrm{tg}\delta = \dfrac{1}{R \cdot \omega C}$.

При частоте приложенного напряжения 50 Гц и величине $\varepsilon \approx 1$ получи $\mathrm{tg}\delta \approx 10^{-11}$. Таким образом, газы можно считать идеальными диэлектриками из-за ничтожно малой величины проводимости и tgδ. Однако таковыми они являются только при напряженностях электрического поля, лежащих ниже значений, необходимых для развития ударной ионизации молекул газа.

При высоких напряжениях и чаще всего в неоднородном электрическом поле, когда напряженность в отдельных местах превосходит некоторое критическое значение, молекулы газа ионизируются, на что расходуется энергия электрического поля, т.е. возникают потери на ионизацию. На рис. 27 показана зависимость tgδ газа от величины приложенного напряжения.

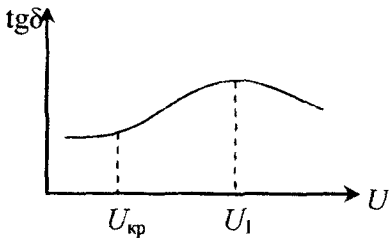


Рис. 27

На начальном участке до $U_{КР}$ потери определяют только токи сквозной проводимости и $tg\delta \approx 10^{-11}$. При $U = U_{КР}$ начинается ударная ионизация. При $U > U_1$, когда газ полностью ионизирован tgδ, достигнув максимального значения, даже несколько уменьшается. Однако при высоких частотах и высоких напряжениях потери, согласно формуле $P = U^2\omega \cdot C \cdot tg\delta$, могут достичь такой величины, что приведут к разогреву и разрушению изделий с газовой изоляцией.

2.4.2. Диэлектрические потери в жидких диэлектриках

Величина tgδ для жидких диэлектриков зависит от того, является ли жидкий диэлектрик неполярным или полярным. Для неполярных жидких диэлектриков tgδ обусловлен как и в газах, только сквозной проводимостью. Величина tgδ можно рассчитать по формуле $tg\delta = 1/R\omega C$. Для неполярных жидкостей $tg\delta \approx 2 \cdot 10^{-4} \ldots 10^{-3}$. Увеличенное значение tgδ неполярных жидкостей по сравнению с газами объясняется большими значениями плотности. электропроводности и диэлектрической проницаемости жидкостей.

Полярные жидкости имеют большие значения tgδ и потерь мощности из-за затрат энергии электрического поля на дипольно-релаксационные виды поляризации. Для полярных жидкостей $tg\delta \leq 0{,}03$.

2.4.3. Диэлектрические потери в твердых диэлектриках

Ввиду разнообразия структуры в твердых диэлектриках возможны различные виды диэлектрических потерь.

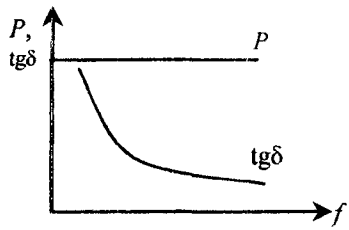
Для неполярных диэлектриков молекулярной структуры основным видом потерь являются, как для газов и неполярных жидкостей, потери от электропроводности. Величина $\mathrm{tg}\delta = 10^{-4}\ldots10^{-3}$ и не зависит от частоты приложенного напряжения. При увеличении температуры $\mathrm{tg}\delta$ возрастает, поскольку увеличивается электропроводность.

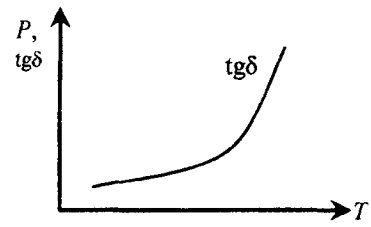
У полярных твердых диэлектриков $\mathrm{tg}\delta = 0{,}003\ldots0{,}03$ и над потерями от электропроводности преобладают потери энергии, затрачиваемые на различные виды релаксационной поляризации: ионно-релаксационные, дипольно-релаксационные, миграционные потери.

Потери в твердых диэлектриках значительно зависят от пористости, влажности.

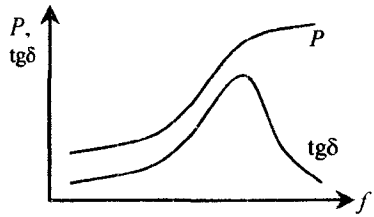
Классификация потерь в твердых диэлектриках

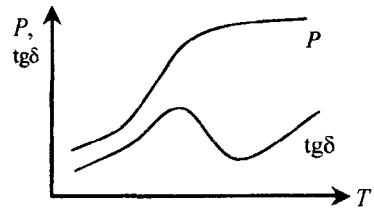
1. Потери, вызванные электропроводностью (неполярные твердые диэлектрики).



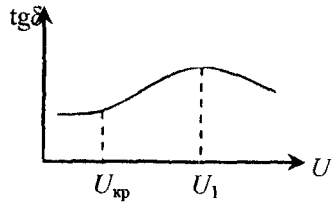


2. Дипольно-релаксационные потери (полярные твердые диэлектрики).

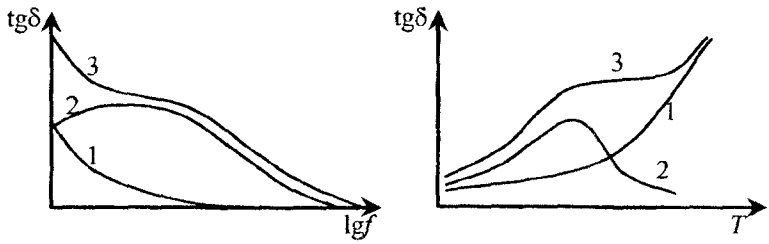




3. Ионизационные потери (твердые диэлектрики, содержащие газовые включения; наблюдаются при высоком напряжении).

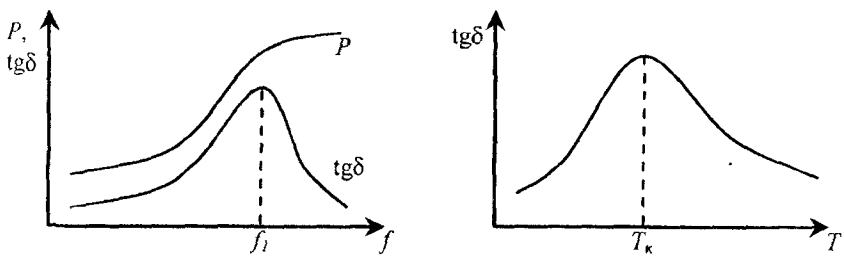


4. Ионно-релаксационные потери (стекла; кристаллы ионной структуры, содержащие дефектные ионы; керамика)



1 – потери проводимости;
2 ионно-релаксационные потери;
3 суммарные потери с разными временами релаксации

5. Потери, вызванные спонтанной поляризацией (сегнетоэлектрики)



$T_к$ – температура Кюри
f_1 – резонансная частота

6. Миграционные потери (слоистые, неоднородные диэлектрики). tgδ имеет сложные зависимости от частоты и температуры, что обусловлено компонентами, входящими в состав диэлектрика.

2.4.4. Измерение диэлектрических потерь

Измерение диэлектрических потерь при профилактических испытаниях осуществляется с помощью высоковольтных мостов или ваттметровых схем измерения. В условиях эксплуатации наиболее широко распространены малогабаритные мосты Р5026, р-595 (рабочее напряжение 5–10 кВ). Измерения могут производиться по нормальной или перевернутой схеме (рис. 28).

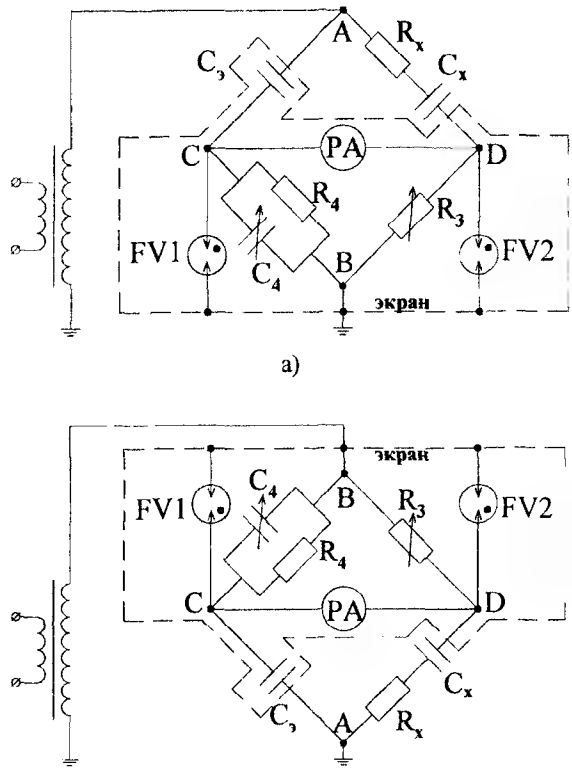


Рис. 28. Принципиальные схемы моста при нормальной (а) и перевернутой (б) схемах измерения:
FV – разрядники; PA – гальванометр;
C_x, R_x – испытательный объект; $C_э$ – эталонный конденсатор;
C_4, R_3, R_4 – элементы измерительной части моста

Нормальная схема применяется при определении tgδ и емкости междуфазовой изоляции или при лабораторных измерениях. При нормальной схеме оба электрода испытуемого объекта должны быть изолированы от земли. Измерительная часть схемы находится под невысоким напряжением, тщательно экранирована от внешних наводок и с помощью разрядников FV защищена от высокого напряжения, которое может появиться на элементах моста при пробе C_x.

При эксплуатационных испытаниях чаще всего приходится пользоваться перевернутой схемой моста. Это вызывается тем, что один электрод испытуемого объекта, как правило, наглухо заземлен (фланец ввода, бак трансформатора, корпус машины). В перевернутой схеме заземление переносится из точки В в точку А. Вся измерительная часть моста оказывается под высоким напряжением. Регулирование C_4, R_3 и настойка гальванометра осуществляются с помощью изолирующих ручек. Чтобы исключить влияние паразитных емкостей на землю, измерительная часть моста защищается экраном, присоединенным к точке В. Однако в данном случае экран находится под высоким напряжением, поэтому он размещается внутри наружного экрана и изолируется от него на полное рабочее напряжение (10 кВ). Наружный экран (корпус моста) заземляется.

Обозначим:

Z_1 и Z_2 – нерегулируемые плечи моста;

Z_3 и Z_4 – регулируемые плечи;

$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3$ – произведение сопротивлений противоположных плеч равны – это условие равновесия моста.

При условии равновесия моста $\varphi_c = \varphi_д$; ток через гальванометр $I_г = 0$.

Изменяя R_3 и C_4 уравновешиваем токи по модулю и фазе, получим

$$\text{tg}\delta = \omega R_4 C_4;$$

если $C_э = 100$ пФ $= 10^{-10}$Ф; $R_4 = \dfrac{10^4}{\pi}$;

получим $$\text{tg}\delta = 2\pi \cdot 50 \cdot \frac{10^4 \cdot C_4}{\pi} = 10^6 \cdot C_4;$$

если C_4 выразить в мкФ, то $\text{tg}\delta = C_4$.

Докажем полученные результаты.

Подставим в условие развития моста значения Z_1, Z_2, Z_3, Z_4:

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_x} + r_x; \qquad Z_2 = \frac{1}{j\omega C_э}; \qquad Z_3 = R_3;$$

$$Z_4 = \frac{R_4 \cdot \frac{1}{j\omega C_4}}{R_4 + \frac{1}{j\omega C_4}} = \frac{R_4 \cdot j\omega C_4}{j\omega C_4 (R_4 \cdot j\omega C_4 = 1)}.$$

$$\frac{(r_x \cdot j\omega C_x + 1) \cdot R_4 \cdot j\omega C_4}{j\omega C_x \cdot j\omega C_4 (R_4 j\omega C_4 + 1)} = \frac{R_3}{j\omega C_э};$$

отсюда $$\frac{r_x \cdot j\omega C_x \cdot R_4 + R_4}{j\omega C_x \cdot R_4 j\omega C_4 + j\omega C_x} = \frac{R_3}{j\omega C_э};$$

$$r_x j\omega C_x \cdot R_4 \cdot j\omega C_э + R_4 \cdot j\omega C_э = j\omega C_x \cdot R_4 j\omega C_4 \cdot R_3 + j\omega C_x R_3;$$

$$- r_x \omega^2 C_x C_x R_4 + R_4 j\omega C_э = -\omega^2 C_x \cdot R_4 \cdot C_4 \cdot R_3 + j\omega C_x R_3,$$

так как комплексные числа равны, то приравниваем мнимую и вещественную части отдельно:

вещественная часть:

$$- r_x \cdot \omega^2 \cdot C_x \cdot C_э \cdot R_4 = -\omega^2 C_x \cdot R_4 \cdot C_4 \cdot R_3,$$

тогда $$r_x = \frac{C_4 \cdot R_3}{C_э};$$

мнимая часть:

$$R_4 j\omega C_э = j\omega C_x R_3; \qquad C_x = \frac{R_4 \cdot C_э}{R_3}.$$

При использовании последовательной схемы замещения диэлектрика $\operatorname{tg}\delta = \omega CR$. Значит:

$$\operatorname{tg}\delta = \omega C_x R_x = \omega \cdot \frac{R_4 \cdot C_э}{R_3} \cdot \frac{C_4 \cdot R_3}{C_э} = \omega R_4 \cdot C_4 ,$$

если $$R_4 = \frac{10^4}{\pi}\left[\text{Ом } C_э = 100\ \text{пФ} = 10^{-10}\right]\text{Ф},$$

то $$\operatorname{tg}\delta = 2\pi \cdot 50 \cdot \frac{10^4}{\pi} \cdot C_4 = 10^6 \cdot C_4 ,$$

если выразить C_4 в мкФ, то $\operatorname{tg}\delta = C_4$.

2.5. Пробой диэлектриков

Пробоем называется потеря диэлектриком его изолирующих свойств. В результате пробоя диэлектрик начинает пропускать электрический ток. Это происходит, если напряженность электрического поля E превысит некоторое критическое значение.

Минимальное приложенное к диэлектрику напряжение, при котором происходит пробой, называется *пробивным напряжением* $U_{пр}$ (кВ, МВ).

Минимальная напряженность однородного электрического поля, при которой произошел пробой, называется *электрической прочностью*:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}, \frac{\text{МВ}}{\text{м}} = \text{кВ/мм} .$$

В справочниках для сравнения способности различных веществ противостоять пробою указывается величина $E_{пр}$.

После пробоя газы восстанавливают свою электрическую прочность, жидкости – тоже, хотя $E_{пр}$ снижается. Твердые диэлектрики разрушаются при пробое и становятся проводящими.

2.5.1. Виды (теории) пробоя

1. Электрический пробой (лавинно-стримерный) наблюдается в основном в газах. В твердых диэлектриках он возможен при кратковременном воздействии высокого напряжения и при идеальном теплоотводе от диэлектрика.

2. Электротепловой (или тепловой) пробой возможен в жидких и твердых диэлектриках при переменном напряжении и недостаточном теплоотводе.

3. Ионизационный пробой возникает при переменном напряжении в диэлектриках, содержащих газовые включения, под воздействием частичных разрядов в этих включениях.

4. Электрохимический пробой. Этот вид пробоя наблюдается при постоянном длительно-действующем напряжении, при высокой влажности, когда усиливаются процессы старения, электропроводности и электрохимического разложения изоляции.

Какой из видов пробоя реализуется в каждом конкретном случае, зависит от многих факторов: от структуры диэлектрика, формы электродов, температуры, толщины диэлектрика, частоты приложенного напряжения.

2.5.2. Пробой газов

Пробой газообразных диэлектриков имеет лавинно-стримерный характер. Он всегда начинается с ударной ионизации. В любом газе имеется некоторое незначительное количество свободных электронов, образованных в результате естественной ионизации внешних ионизирующих факторов: радиации земной коры, световых квантов, космического излучения и т.д. Для начала ударной ионизации необходимо, чтобы кинетическая энергия этих электронов, разгоняемых электрическим полем, стала больше энергии ионизации. Тогда при соударении движущегося электрона с атомом (или молекулой) газа возможен отрыв электрона из атома, в результате чего атом превращается в положительный ион.

Кинетическая энергия электрона в электрическом поле

$$W_e = E \cdot q \cdot \lambda,$$

где E – напряженность электрического поля; q – заряд электрона; λ – длина свободного пробега.

Энергия ионизации

$$W_и = U_и \cdot q,$$

где $U_и$ – ионизационный потенциал, значение которого для разных газов от 4 до 25 В; энергия ионизации лежит в пределах 4...25 эВ.

Ударную ионизацию производят электроны как наиболее подвижные по сравнению с ионами. Соударения электронов с атомами газа не всегда приводят к отрыву электрона из атома, а могут перевести электрон в атоме со стационарной орбиты на более удаленную – возбужденный уровень. Возвращаясь на свой стационарный уровень (орбиту) электрон отдает полученную энергию в виде фотона $\varepsilon = h\nu$ – кванта света. Фотон имеет скорость $3 \cdot 10^8$ м/с, из-за чего он тоже может производить ионизацию. Этот процесс ионизации называется *фотоионизацией*. Она опережает ударную, так как скорость фотонов больше. Ударная и фотоионизация дают начало лавинам электронов. После прохождения первой лавины (число электронов достигает 10^9) за ней остается положительный объемный заряд, образованный медленно движущимися положительными ионами. В него втягиваются электроны вторичных «дочерних» лавин, что приводит к образованию высокоионизированного электропроводящего канала – стримера. Продвижение стримера происходит быстрее, чем движение электронных лавин, из-за интенсивной ионизации фотонами, скорость которых намного превосходит скорость электронов.

Стример обгоняет лавину. Он с избыточным отрицательным зарядом в канале устремляется к положительному электроду – аноду. Стример, имеющий избыточный положительный заряд, продвигается к отрицательному электроду – катоду. При достижении отрицательным и положительным стримером электродов межэлектродное газовое пространство оказывается соединенным высокопроводящим каналом–газоразрядной плазмой. Плазма как высокоионизированный канал обладает минимальным электрическим сопротивлением. Прохождение электронов, излучаемых катодом, по проводящему каналу плазмы и означает пробой газового промежутка. Внешне он проявляется в виде электрической искры. Пробивным напряжением газа является напряжение, при котором происходит искровой разряд. При большой мощности источника искровой разряд может перейти в дуговой. В дуговом разряде имеет место

термическая ионизация газа, поскольку температура в плазменном канале достигает нескольких тысяч градусов. Время развития разряда в газах составляет всего 10^{-8}с при расстоянии между электродами 1 см.

В неоднородном электрическом поле, в котором $E \neq \text{const}$, полному пробою предшествует явление короны. Корона представляет собой местный, локальный разряд, возникающий в месте большей напряженности поля (у края электрода, у электрода в форме острия). Корона развивается дольше по времени и может привести к полному пробою газового промежутка, а может и не привести. На линиях электропередач, там, где электрическое поле очень неоднородно, корона (свечение) наблюдается долго. При переменном напряжении пробой газов происходит на амплитуде напряжения, поэтому электрическая прочность газов $E_{пр}$ измеряется в максимальных (амплитудных) значениях. Для воздуха при синусоидальном напряжении частотой 50 Гц в однородном электрическом поле ($E = \text{const}$) при расстоянии между электродами 1 см и нормальных атмосферных условиях электрическая прочность $E_{пр} = 3$ МВ/м. В неоднородном электрическом поле ($E \neq \text{const}$) $E_{пр} = 0{,}8$ МВ/м и зависит от расстояния между электродами.

При очень малых расстояниях (рис. 29) электрическая прочность увеличивается, что объясняется затруднением формирования лавин. При расстоянии 5 мкм между электродами прочность воздуха $E_{пр} \approx 70$ МВ/м, т.е. возрастает в 20 раз!

Электрическая прочность газов зависит от их плотности, которая прямо пропорциональна давлению и обратно пропорциональна температуре. При постоянной температуре зависимость электрической прочности газов от давления представлена на рис. 30.

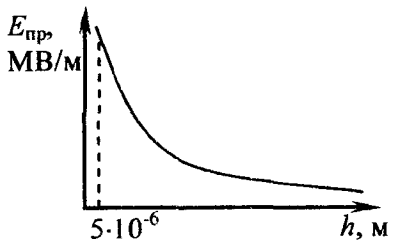


Рис. 29. Зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами

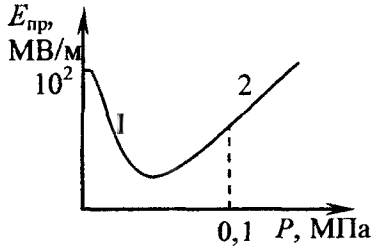


Рис. 30. Зависимость электрической прочности газа от давления

Рост $E_{пр}$ (на участке 2) объясняется тем, что уменьшается энергия электронов, необходимая для начала ударной ионизации, из-за уменьшения λ – длины свободного пробега ($W_e = E \cdot q \cdot \lambda$).

Рост $E_{пр}$ (на участке 1) при уменьшении давления вызван тем, что при достаточно большом разряжении ионизация затрудняется из-за уменьшения вероятности столкновения электронов с молекулами газа. В вакууме разряд определяется не ударной ионизацией, а «вырыванием» электронов с поверхности катода – холодной эмиссией. Для газов существует определенное минимальное пробивное напряжение, которое лежит в пределах 195...420 В. Для воздуха оно составляет 300 В.

Увеличение электрической прочности газов при больших давлениях и больших разряжениях используется в технике в высоковольтных конденсаторах, выключателях, кабелях и др.

Наблюдается зависимость электрической прочности газов от частоты приложенного напряжения (рис. 31).

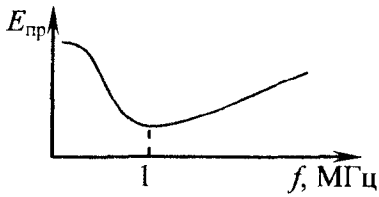


Рис. 31

Падение $E_{пр}$ с ростом частоты вызвано искажением поля положительным объемным зарядом, образованным вследствие малой подвижности ионов. С дальнейшим увеличением частоты рост $E_{пр}$ вызывается затруднением развития лавин.

При увеличении влажности прочность воздуха увеличивается, так как молекулы воды, содержащиеся во влажном воздухе, «захватывают» свободные электроны, образуя тяжелые отрицательные ионы.

Инертные газы обладают пониженной по сравнению с воздухом электрической прочностью: у них низкий потенциал ионизации. Электрическая прочность тяжелых газов выше, чем электрическая прочность воздуха. Такими газами являются элегаз SF_6, $E_{пр}$ которого в 2,5 выше, чем у воздуха; фреон CCl_2F_2, его $E_{пр}$ в 2,6 раза

выше, чем у воздуха; метан CCl_4, прочность которого в 6 раз выше, чем прочность воздуха.

Наиболее благоприятными свойствами для применения в качестве газовой изоляции с повышенной электрической прочностью обладает элегаз.

2.5.3. Пробой жидких диэлектриков

Электрическая прочность жидких диэлектриков и механизм пробоя сильно зависят от чистоты жидкости. Электрический пробой у сверхчистых жидкостей происходит как у газов, за счет ударной ионизации электронами, вырванными из катода. Величина электрической прочности при этом велика. Она значительно превосходит $E_{пр}$ газов вследствие большей плотности жидкостей по сравнению с газами.

В связи с исключительно большими трудностями сохранения высокой степени чистоты жидких диэлектриков особо тщательно очищенные жидкости не имеют промышленного значения.

Технически чистые применяемые жидкие диэлектрики содержат в ничтожных количествах различные примеси, особенно возможно содержание в них газов и воды. Причины нахождения их в жидких диэлектриках могут быть различны. Прежде всего, надо иметь в виду, что все жидкие диэлектрики способны впитывать и растворять в себе некоторое количество газов и воды. Кроме того, микроскопические объемы газов остаются на поверхности твердых тел, погруженных в жидкие диэлектрики (например, на поверхностях электродов или в твердой изоляции, находящейся в жидкости). Согласно одной из теорий, механизм пробоя технически очищенного жидкого диэлектрика объясняется ионизацией, находящихся в нем газовых объемов. В том месте, где началась ионизация газов, резко усиливается напряженность электрического поля и возникают ионизированные «газовые мостики», что и приводит в конечном счете к пробою.

Механизм пробоя жидких диэлектриков, содержащих влагу, объясняется следующим образом. Вследствие большой диэлектрической проницаемости частички влаги втягиваются в область наибольшей напряженности электрического поля, поляризуются и вытягиваются вдоль силовых линий поля, образуя водяные цепочки. При нарушении цепочки или образовании неполной цепочки возникают сильные локальные напряженности. В этих местах начинаются

ионизационные процессы с возможным газообразованием при повышении температуры до температуры кипения, что приводит к пробою всего межэлектродного пространства. Особенно сильно снижает электрическую прочность влага в присутствии волокон целлюлозы, которые адсорбируют влагу, облегчая образование цепочек (рис. 32).

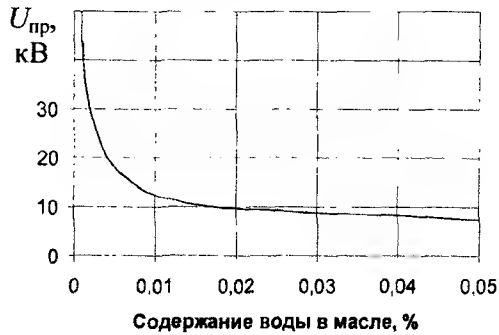


Рис. 32. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от содержания в нем воды

Таким образом, в большинстве случаев в конечной стадии пробой жидких диэлектриков происходит по газовому каналу.

Из-за наличия некоторого количества примесей, находящихся в каждом технически чистом жидком диэлектрике, величина пробивного напряжения жидкостей подвержена большому статистическому разбросу. Поэтому электрическая прочность технически чистых жидкостей мало зависит от их химического состава, а по существу характеризует степень их чистоты. Обычно $E_{пр}$ лежит в пределах 10...20 МВ/м, а у особо тщательно очищенных жидкостей $E_{пр}$ достигает 100 МВ/м.

Электрическая прочность жидких диэлектриков зависит от температуры приложенного напряжения. Резкое падение электрической прочности происходит при температурах, близких к температурам кипения, когда в жидкости появляется большое количество паров. Своеобразная зависимость электрической прочности от температуры наблюдается в жидких диэлектриках, содержащих воду. Вода в жидкостях может быть в двух состояниях: 1) в виде молекулярного раствора; 2) в виде эмульсии (более крупные образования). При по-

вышении температуры выше комнатной эмульсионная вода переходит в состояние молекулярного раствора, что делает жидкость более однородной. Вследствие этого электрическая прочность жидкости, в частности трансформаторного масла, возрастает до некоторого максимума, после чего падает из-за увеличения электропроводности. В сухом масле, не содержащем воды, электрическая прочность не имеет максимума (рис. 33).

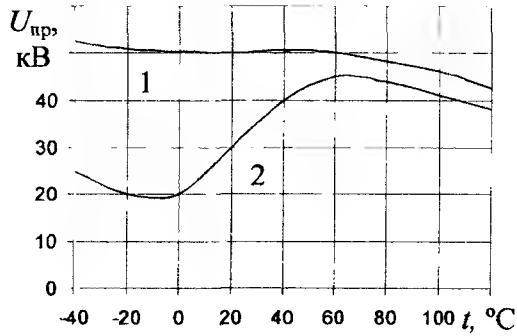


Рис. 33. Зависимость пробивного напряжения от температуры сухого (1) и содержащего следы воды (2) трансформаторного масла

При переменном напряжении электрическая прочность жидких диэлектриков несколько выше, чем при постоянном, что объясняется затруднением при переменном напряжении образования газовых мостиков и водяных цепочек. Однако при повышенных частотах приложенного напряжения электрическая прочность жидких диэлектриков уменьшается вследствие роста диэлектрических потерь.

2.5.4. Пробой твердых диэлектриков

В твердых диэлектриках возможны все виды пробоя: электрический, электротепловой (тепловой), ионизационный и электрохимический.

В каждом конкретном случае реализация того или ионного вида пробоя зависит от ряда факторов: от структуры диэлектрика, времени воздействия напряжения, характера изменения напряжения, условий охлаждения диэлектрика, формы электродов их площади.

Электрический пробой

В твердом диэлектрике этот вид пробоя возможен при кратковременном воздействии постоянного напряжения или при импульсах. Он происходит, когда созданы идеальные условия охлаждения и теплоотвода, исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь. Протекает он за время не более $10^{-7}...10^{-8}$ с и по природе своей является чисто электронным процессом (как в газах) с ударной ионизацией и образованием электронных лавин. Высокое значение $E_{пр}$ при электрическом пробое твердых диэлектриков обусловлено малой (по сравнению с газами и жидкостями) величиной свободного пробега электронов (λ), что следует из $W_e = qE\lambda$.

Электротепловой (тепловой) пробой

Он является основным видом пробоя, происходящим в твердых диэлектриках, работающих при переменном напряжении.

Всякий реальный диэлектрик обладает некоторой электропроводностью, которая приводит к нагреву диэлектрика (потерям). При постоянном напряжении потери вызваны лишь мизерным током сквозной проводимости $P = I_{скв} \cdot U$. При переменном напряжении к потерям от сквозной проводимости прибавляются потери от релаксационных видов поляризации и нагрев диэлектрика больше.

В этом случае $P = U^2\omega C \cdot \mathrm{tg}\delta$. Потери ведут к увеличению температуры диэлектрика. Рост температуры ведет к увеличению тока в связи с уменьшением сопротивления диэлектрика, из-за чего диэлектрик нагревается еще больше. Следовательно, происходит рост температуры и диэлектрических потерь в диэлектрике. В этом и заключается предпосылка к тепловому пробою. Но реализация этой предпосылки зависит от ряда условий.

Наряду с нагревом диэлектрика происходит теплоотдача в окружающую среду (рис. 34).

$$P = \delta S (T_2 - T_o),$$

где P – мощность, отводимая от диэлектрика в окружающую среду; δ – коэффициент теплопроводности диэлектрика; S – площадь поверхности; T_2 – температура внутри диэлектрика; T_o – температура окружающей среды.

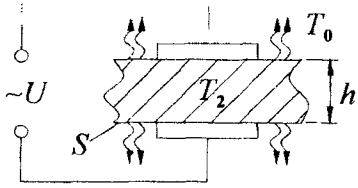


Рис. 34

Если при приложении данного напряжения во внутренних объемах диэлектрика не может установиться тепловое равновесие, то при достаточном воздействии напряжения произойдет разрушение диэлектрика. Он обуглится или расплавится, что приведет к короткому замыканию электродов – к электротепловому пробою. Возможность электротеплового пробоя сводится к вопросу теплового равновесия: если мощность, выделяющаяся внутри диэлектрика за счет диэлектрических потерь, будет все время больше мощности, отводимой в данных условиях в окружающую среду, то электротепловой пробой неизбежен при достаточно длительном приложении напряжения.

Графики мощности, выделяемой внутри диэлектрика за счет потерь и мощности, отводимой в окружающую среду, представлены на рис. 35.

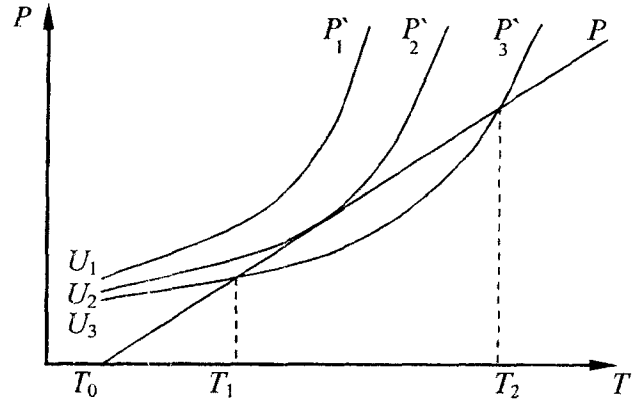


Рис. 35. Зависимость мощности, выделяемой в результате диэлектрических потерь при разных напряжениях (кривые P'_1, P'_2, P'_3; $U_1 > U_2 > U_3$), и отводимого тепла (прямая P) от температуры

При сравнительно небольшом напряжении U_3, которому соответствует кривая выделяющегося в диэлектрике тепла P_3', температура внутри диэлектрика повысится до значения T_1, при котором наступит тепловое равновесие: количество тепла, выделяющегося внутри диэлектрика, будет равно количеству тепла, отдаваемого в окружающую среду. При напряжении U_3 в данных условиях диэлектрик будет работать без опасности электротеплового пробоя. При более высоком напряжении U_2, которому соответствует кривая P_2', тепловое равновесие неустойчивое; ему соответствует только одно значение температуры – абсцисса точки касания кривой P_2' с прямой P. Такое напряжение диэлектрик может выдерживать только кратковременно, пока происходит его нагревание диэлектрическими потерями. При достаточно большом напряжении U_1, которому соответствует кривая P_1', тепловое равновесие совершенно невозможно. Однако и в этом случае произойдет пробой при напряжении U_1, не мгновенно, так как температура не может подняться мгновенно до опасного предела.

Согласно теории теплового пробоя пробивное напряжение твердого диэлектрика при переменном напряжении можно определить из следующего уравнения:

$$U_{\text{пр.эфф}} = K\sqrt{\frac{\delta h}{f \cdot \varepsilon \cdot \alpha \cdot \operatorname{tg}\delta}},$$

где K – числовой коэффициент, зависящий от выбора системы единиц;

δ – теплоотдача в окружающую среду, Вт/с · м^2·К;

h – толщина диэлектрика;

f – частота приложенного напряжения;

ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

α – температурный коэффициент удельной проводимости.

Расчеты по приведенной формуле не всегда дают значения пробивного напряжения, совпадающие с полученными на опыте. Это говорит о том, что аналитический метод теплового расчета в ряде случаев не отображает все сложные закономерности, происходящие при этом процессе пробоя.

Таким образом, вероятность теплового пробоя увеличивается:

1) при переменном напряжении;

2) уменьшении площади поверхности диэлектрика;

3) повышении окружающей температуры;

4) увеличении толщины диэлектрика;

5) длительном воздействии напряжения.

Для чисто электрического пробоя твердого диэлектрика характерно, что он происходит в том месте диэлектрика, где наибольшая напряженность электрического поля (например, у краев электродов). Тепловой же пробой происходит в месте наихудшего теплоотвода, например, в середине диэлектрика. Для того чтобы не допустить теплового пробоя, необходимо улучшать теплоотдачу в окружающую среду, т.е. делать развитую поверхность диэлектрика; охлаждать его.

Стойкость к тепловому пробою зависит от нагревостойкости материала.

Нагревостойкостью называется максимальная температура, при которой материал может длительно работать без заметного ухудшения его электроизоляционных свойств.

Есть 7 классов нагревостойкости:

Класс	Y	A	E	B	F	H	C
t, °C	90	105	120	130	155	180	>180

Нагревостойкость менее класса Y имеют резина, трансформаторное масло, полистирол, $t \approx 60$ °C.

Y – 90 °C – волокнистые материалы на основе целлюлозы (бумага, пряжа, картоны, ткань) – не пропитанные.

A – 105 °C – те же самые материалы, но пропитанные лаками, смолами или помещенные в жидкий диэлектрик.

E – 120 °C – пластики с органическим наполнителем (гетинакс, текстолит, эпоксидные смолы.

B – 130 °C – материалы, содержащие неорганические соединения, например, стеклолакоткани материалы из слюды.

F – 155 °C – изделия из слюды (слюдопласты), содержащие связующие повышенной нагревостойкости, термореактивные эпоксидные или кремнийорганические смолы.

H – 180 °C – кремнийорганические смолы.

C > 180 °C – неорганические материалы (слюда, стекло, асбест, фарфор), фторопласт и полиимиды.

Ионизационный пробой

Он возможен при переменном напряжении в твердых диэлектриках, содержащих газовые включения (рис. 36).

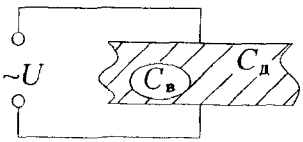


Рис. 36

Поскольку

$$\varepsilon_в E_в = \varepsilon_д E_д,$$

где $\varepsilon_в E_в$ – диэлектрическая проницаемость и напряженность электрического поля в воздушном включении; $\varepsilon_д$, $E_д$ – аналогичные параметры твердого диэлектрика. Если $\varepsilon_в < \varepsilon_д$, то $E_в > E_д$. Для диэлектрика ε превосходит в 3–4 раза ε газов. Значит, напряженность поля в воздушном включении увеличена в 3–4 раза по сравнению с ее значением в твердом диэлектрике.

При такой напряженности в воздушном включении может произойти пробой – это называется частичным разрядом. При пробое воздушного включения выделяется энергия

$$W = \frac{Q_в U_в}{2} = \frac{C_в U_в^2}{2}.$$

При увеличении напряжении и большом количестве газовых включений интенсивность частичных разрядов растет. Растет и выделяемая энергия, что приводит к пробою. Если и не происходит пробоя (при малой интенсивности частичных разрядов), то все равно длительное их образование приводит к выделению озона и других активных веществ, приводящих к старению, химическому и термическому разрушению (растрескиванию) твердой изоляции. При переменном напряжении вероятность частичных разрядов выше, а напряжение их образования ниже.

Электрохимический пробой

Этот вид пробоя наблюдается при постоянном и переменном напряжениях низкой частоты, когда в материале развиваются процессы, ведущие к необратимому уменьшению электрического сопротивления

(электрохимическое старение). Эти причины связаны с диссоциацией молекул примесей и нарастанием ионного тока при высокой влажности и повышенной температуре в загрязненной изоляции. Для развития электрохимического пробоя требуется длительное время. Он может произойти даже при номинальном напряжении установки.

3. ДИЭЛЕКТРИКИ

3.1. Газы в качестве электрической изоляции

Газы как электроизоляционные материалы имеют ряд достоинств:

1) после электрического пробоя полностью восстанавливают свою электрическую прочность;

2) не стареют;

3) имеют весьма малый tgδ ($\approx 10^{-10}$) и высокое сопротивление ($\rho \approx 10^{18}$ Ом·м). Недостатком газов, в том числе самого распространенного – воздуха, является их низкая электрическая прочность.

Воздух является естественной внешней изоляцией всех электротехнических установок. Присутствие воздуха во внутренней изоляции трансформаторов, кабелей и других весьма нежелательно, поскольку, имея низкую электрическую прочность, он способствует пробою изоляции, а также окисляет изоляцию и металлы, вызывая их старение, поддерживает горение, увеличивая пожароопасность изоляции и оборудования.

Воздух нашел применение в воздушных выключателях в качестве дугогасящей среды. В высоковольтных выключателях (6...35 кВ) применяется либо сжатый воздух ($p \approx 4...8$ МПа), либо вакуум ($p \approx 10^{-5}$ Па). Благодаря низкому и стабильному значению тангенса угла диэлектрических потерь вакуум используется в качестве диэлектрика в высокочастотных и высоковольтных конденсаторах.

Повышенную электрическую прочность по сравнению с воздухом имеют некоторые тяжелые газы с большой молекулярной массой. Все они являются электроотрицательными. К ним относятся элегаз (SF_6), фреон (CCl_2F_2) и некоторые другие газы с молекулами сложного строения.

Наибольшее применение в качестве газовой изоляции получил *элегаз* SF_6. Он получается путем электролиза расплавленной серы в атмосфере фтора. Элегаз в 5 раз тяжелее воздуха, а его электрическая прочность в 2,5 раза выше, чем у воздуха. Элегаз не имеет ни цвета, ни запаха, химически устойчив до температуры 800 °С, не агрессивен по отношению к твердой изоляции и металлам. Его температура кипения (сжижения) составляет 63,8 °С. При нормальной температуре он может быть сжат до 20 атмосфер без снижения, при этом его электрическая прочность растет пропорционально давлению.

Применяют элегаз из-за высокого значения $E_{пр}$, высокого ρ и малого $tg\delta$ в конденсаторах, кабелях и высоковольтных выключателях и др. Элегазовые кабели имеют преимущества перед кабелями с бумажно-масляной изоляцией при прокладке на крутонаклонных трассах (масло не стекает, не образуются пустоты). Элегазовые кабели имеют малую электрическую емкость, хорошее охлаждение и негорючи. Элегазовые выключатели по сравнению с воздушными отличаются существенно более высокой дугогасящей способностью, применяются на более высокое напряжение и имеют меньшие габариты.

Другим газом, применяемым для электроизоляционных целей, является *фреон* CCl_2F_2. Его электрическая прочность в 2,5 раза выше прочности воздуха, но кипит он при температуре 28 °С и сжать его можно до 6 атмосфер. Ферон используют в качестве так называемой «кипящей изоляции» в трансформаторах, где он является одновременно изолирующей и охлаждающей средой. Такая изоляция применяется в целях повышения пожаробезопасности, например, в трансформаторах на электровозах, в некоторых высоковольтных высокочастотных установках.

В качестве добавки к элегазу в кабелях и выключателях применяют азот, который снижает стоимость изделия, а также улучшает дугогасящие свойства элегазовых выключателей.

Водород широко применяется в качестве электроизоляционной и охлаждающей среды в крупных турбогенераторах. Его электрическая прочность на 40% ниже, чем у воздуха, однако теплопроводность в 6 раз выше. На электрических станциях водород получают электролизом из воды. При охлаждении водородом в 10 раз уменьшаются вентиляционные потери и шум вентиляции, удлиняется срок службы твердой изоляции генератора вследствие отсутствия

процессов окисления и образования азотистых соединений. В смеси с воздухом при содержании от 4% и выше водород очень взрывоопасен (гремучий газ).

Инертные газы (аргон, неон, гелий, ксенон) имеют очень низкие потенциалы ионизации, поэтому электрическая прочность их очень низкая. Самая низкая прочность гелия в 17 раз ниже, чем у воздуха. Все инертные газы применяются в технике слабых токов в газоразрядных трубках и лампах, а также в эталонных конденсаторах, газонаполненных разрядниках.

3.2. Жидкие диэлектрики

В электротехнических установках жидкие диэлектрики применяются в качестве изоляции с высокой электрической прочностью, а также как охлаждающая и дугогасящая среда. Общие требования к жидким диэлектрикам можно сформулировать следующим образом:

1) высокая электрическая прочность;
2) высокое ρ;
3) низкий $tg\delta$;
4) необходимое значение ε;
5) стабильность свойств в условиях эксплуатации;
6) совместимость с применяемыми материалами;
7) пожаробезопасность;
8) экологическая безопасность.

Ни один жидкий диэлектрик не соответствует всем этим требованиям одновременно. Поэтому в каждом конкретном случае приходится отдавать предпочтение тем свойствам жидкого диэлектрика, которые являются важнейшими для обеспечения требуемых функций.

До сих пор применяют масла растительного происхождения. Растительное масло, применяемое для пропитки конденсаторов, – это касторовое (из семян клещевины). Оно не разрушает бумажную изоляцию и имеет высокую способность к газопоглощению. Молекулы масла при этом уплотняются, ионизационные процессы не происходят и срок службы этих конденсаторов велик.

Однако растительные масла легко окисляются кислородом воздуха, поэтому необходимо исключить возможность контакта касторового масла с воздухом.

Наиболее применимы следующие жидкие диэлектрики:

1) минеральные масла (трансформаторное, конденсаторное, кабельное);

2) синтетические жидкости на основе нехлорированных углеводородов;

3) синтетические кремнийорганические жидкости;

4) синтетические фторорганические жидкости.

3.2.1. Минеральные (нефтяные) масла

Минеральные масла являются продуктами переработки природного жидкого минерала – нефти.

По химическому составу нефть представляет собой сложную смесь углеводородов трех типов:

1. Парафиновые – C_nH_{2n+2}. Это насыщенные углеводороды, отличающиеся химической инертностью.

2. Нафтеновые – C_nH_{2n}. Это линейные циклические структуры. Они имеют низкую температуру застывания и большую стойкость против окисления.

3. Ароматические – C_nH_{2n-2}. Это круговые структуры с двойными связями между атомами углерода. Они отличаются повышенной плотностью и высокой электрической прочностью.

В нефтяных маслах необходимо определенное количество ароматических углеводородов, так как они связывают активный водород Н в момент выделения его из парафиновых и нафтеновых молекул. Этим увеличивается газостойкость масла. Однако при повышенном содержании ароматических углеводородов растет $tg\delta$ масел.

Получают нефтяные масла путем ступенчатой вакуумной перегонки нефти. При температуре 180 °С из нефти удаляются легко летучие компоненты – бензин, керосин, легроин. Для получения трансформаторного, конденсаторного и кабельного масел в качестве исходного полуфабриката применяется соляровый дистиллят. Эта фракция вакуумной перегонки нефти соответствует интервалу температур 280...350 °С. Соляровый дистиллят – это сырое масло. Для того чтобы получить изоляционные масла с требуемыми физико-техническими и электрическими свойствами дистиллят очищают. В процессе очистки удаляют полярные соединения, органические кислоты, твердые углеводороды, некоторые серо- и азотосодержащие соединения, непредельные углеводороды и др.

Трансформаторное масло. Оно применяется в силовых высоковольтных трансформаторах, выключателях, вводах, в устройствах регулирования напряжения и др.

В трансформаторах масло выполняет две функции: увеличивает электрическую прочность, заполняя поры и промежутки в твердой изоляции трансформатора, а также улучшает отвод тепла от его токоведущих частей и сердечника (теплопроводность масла в 30 раз больше, чем у воздуха).

В высоковольтных масляных выключателях масло является газогенерирующей дугогасящей средой. Соприкасаясь с дугой, имеющей температуру 2000 °С, масло, во-первых, способствует охлаждению канала дуги и электродов, во-вторых, при такой высокой температуре масло разлагается с выделением большого количества газов, в основном водорода, находящихся под повышенным давлением. Все это способствует быстрому погасанию дуги.

Получение трансформаторного масла из солярового дистиллята сводится к следующему:

1. Обработка серной кислотой H_2SO_4, при этом растворяются органические кислоты и другие нестойкие примеси.
2. Обработка раствором едкого натрия NaOH для нейтрализации серной кислоты.
3. Промывка водой H_2O для удаления продуктов нейтрализации – натровых масел и солей.
4. Сушка и очистка центрифугами.

Для сушки и очистки от растворенных влаги, газов и других примесей применяют различные вакуумдегазационные установки. Также применяют обработку искусственными цеолитами (молекулярные сита) и магнитные фильтры. При необходимости используется дополнительная очистка адсорбентами (силикогель S_iO_2, алюмогель Al_2O_3).

Адсорбенты являются поверхностно-активными минеральными веществами (глинами, обладающими благодаря мелкодисперсной структуре большой удельной поверхностью – до 1000 $м^2$ на 1 г). Адсорбенты, смешанные с маслом, при осаждении уносят из него разные примеси, преимущественно соединения, состоящие из дипольных молекул. Этим достигается повышение качества масла, в частности снижение кислотности без разрушения основных углеводородов. Снижение кислотности уменьшает электропроводность.

Свойства полученного масла проверяют на соответствие требуемым физико-химическим и электрофизическим показателям.

Для трансформаторных масел при 20 °С плотность $d \le 0{,}9 \cdot 10^3$ кг/м^3; $\varepsilon = 2{,}2 \ldots 2{,}3$; $\mathrm{tg}\delta \approx 0{,}002$, т.е. трансформаторное масло – неполярный диэлектрик; кинематическая вязкость – не более $30 \cdot 10^{-6}$ м^2/с; температура застывания не выше минус 45°...50 °С температура вспышки – не ниже 135 °С. Стандартизированы и многие другие показатели.

В процессе эксплуатации масло «стареет», что сопровождается ухудшением его химических и электрофизических показателей. В результате старения в масле появляется вода, перекиси, шлам, смолы, кислоты, что увеличивает вязкость и кислотное число масла, ухудшает его электроизоляционные свойства. Старение масла ухудшает свойства твердых электроизоляционных материалов, содержащихся в масле, в первую очередь содержащих целлюлозу, а также вызывает коррозию соприкасающихся с маслом металлов. Образующиеся при старении смолы, как более тяжелые, осаждаются на погруженных в масло деталях в виде слоя «ила», значительно ухудшая теплоотвод.

В трансформаторах (а также после разрыва электрической дуги в масляном выключателе) может произойти *крекинг* (разрыв молекул с образованием углеводородов пониженной молекулярной массы), что приводит к понижению температуры вспышки.

При старении в электрическом поле некоторые сорта масел выделяют газы; это очень вредно, так как пузырьки газов могут стать очагами ионизации.

Старению способствуют:

1. Высокие напряженности электрических полей и световое излучение.
2. Контакт масла с воздухом (кислородом).
3. Катализаторами старения являются медь и ее сплавы, железо, кобальт и др.
4. Повышенная температура (недопустимо повышение температуры масла выше 95 °С).

Существует практически верное правило для любой изоляции – правило десяти градусов: увеличение рабочей температуры на 8...12 °С вдвое сокращает срок службы изоляции! Это следует из известного химического закона Аррениуса, по которому скорость (K) химической реакции зависит от температуры (T):

$$K = K_0 \exp(-W_a/RT),$$

где W_a – энергия активации;

R – универсальная газовая постоянная.

Для замедления процесса старения трансформаторного масла рекомендуется добавление к нему ***ингибиторов*** – замедлителей (антиокислительных присадок), которые действуют противоположно катализаторам. Таковы ионол, амидопирин и некоторые другие вещества. Для каждого типа масла необходим подбор соответствующего ингибитора. Применение правильно выбранных ингибиторов позволяет увеличить срок эксплуатации масла и дает большой экономический эффект. Применяют и другие мероприятия для замедления старения масла. Так, воздух над уровнем масла в трансформаторах (а также в баках, в которых хранится запас масла) сообщается с наружным воздухом через воздухоочистительные фильтры. Эти фильтры заполняются силикагелем, хлористым кальцием и тому подобными веществами, которые поглощают из воздуха влагу, пыль и химически активные загрязнения. Часто заполняют промежуток над маслом в герметичном баке трансформатора вместо воздуха азотом, чтобы исключить доступ кислорода к маслу (азотная защита).

Продукты старения выводят, производя регенерацию (восстановление свойств) масла. ***Регенерация*** начавшего стареть масла, достигается обработкой масла адсорбентами (продукты старения масла являются полярными примесями в неполярном масле). Помимо регенерации определенного количества масла с последующей заливкой его в трансформатор возможно вести непрерывный процесс регенерации масла в работающем трансформаторе. Для этой цели трансформатор снабжают термосифонным фильтром. Масло, нагреваясь во время работы трансформатора и уменьшая при этом свою плотность, поднимается в верхнюю часть бака, попадает в трубопровод термосифона, проходит сверху вниз сквозь фильтр со слоем адсорбента и поступает в нижнюю часть бака трансформатора. Фильтр при помощи вентилей можно отключать для смены адсорбента.

Кабельные и конденсаторные масла. Конденсаторные масла применяются для пропитки силовых конденсаторов, при этом достигаются две цели: повышается электрическая прочность изоляции и увеличивается диэлектрическая проницаемость. То и другое дает

возможность увеличить емкость конденсатора, уменьшить его габариты и вес. Кабельные масла в чистом виде или в смеси с другими материалами используют для повышения электрической прочности высоковольтных кабелей и лучшего охлаждения.

Поскольку в условиях эксплуатации конденсаторов и кабелей невозможно производить замену или регенерацию их масел, то применяемые жидкости должны иметь высокие диэлектрические свойства и сохранять стабильность их в течение всего срока службы. Это достигается более тщательной очисткой этих масел при получении с обязательным использованием адсорбентов. Значения tgδ для конденсаторных и кабельных масел не должны превышать 0,002 при $t = +100$ °С и $f = 50$ Гц, а $E_{пр} \geq 20$ МВ/м. Кабельные масла должны иметь более высокую температуру вспышки ($t \geq 165$°С), чем трансформаторные (во избежание возгорания). Высокие требования к конденсаторным и кабельным маслам предъявляются по газостойкости. В них недопустимы малейшие содержания газов. Рабочие напряженности электрических полей, при которых работают в/в конденсаторы и кабели таковы, что вызывают ионизационные процессы в газовых включениях. Ионизация, как минимум, постепенно разрушает изоляцию конденсаторов и кабелей и сокращает срок их службы или вовсе приводит к пробою оборудования.

Различные типы кабельных масел отличаются величиной вязкости. Для кабелей до 35 кВ применяют вязкую пропитку – масляно-канифольный компаунд (15...30% канифоли). В маслонаполненных кабелях на напряжение 110 кВ и выше используют масловязкие масла. У концевых и стопорных муфт стоят баки давления и баки питания, обеспечивая определенное давление масла во избежание образования пустот. Без подпитки маслонаполненные кабели на напряжение 110 кВ и выше работать не могут.

3.2.2. Синтетические жидкие диэлектрики

На протяжении последних 50 лет разработан целый ряд синтетических жидких электроизоляционных материалов. Их применение постоянно расширяется, так как они по многим характеристикам превосходят нефтяные масла. Достоинствами их в первую очередь являются стабильность свойств в большом интервале температур и негорючесть.

Сначала были получены негорючие хлорированные синтетические углеводороды, однако из-за токсичности их применение ограничивалось, а сейчас повсеместно запрещено.

В настоящее время находят применение синтетические жидкие диэлектрики, не содержащие хлора, на основе полиорганосилоксановых (кремнийорганических) и фторорганических соединений.

Кремнийорганические жидкие диэлектрики представляют собой полимеры с небольшой молекулярной массой, основу которых составляет устойчивая силоксановая группировка $-\overset{|}{\underset{|}{Si}}-O-\overset{|}{\underset{|}{Si}}-O-\overset{|}{\underset{|}{Si}}-$. В качестве радикалов могут быть группы метила $-CH_3$, этила $-C_2H_5$, фенила $-C_6H_5$ и др. Все кремнийорганические жидкости обладают высокими электроизоляционными свойствами, мало зависящими от частоты приложенного напряжения, температуры и влажности окружающей среды. Температура кипения их превышает 100 °С. Вязкость их при изменении температуры от 0 до 100 °С уменьшается в 9 раз, а у трансформаторного масла – более чем в 2000 раз. Стабильны значения $\varepsilon(\sim 2{,}0)$ и $\mathrm{tg}\delta$ ($\sim 0{,}0002$). Кремнийорганические жидкости горючи, но температура вспышки их высока (~ 300 °С). При горении они выделяют плотные пары, содержащие мельчайшие частицы кремния, углекислый газ CO_2, водяные пары, которые способствуют погасанию пламени. Таким образом, применение этих жидкостей в качестве диэлектрика позволяет поднять рабочую температуру оборудования до 180 °С, повышает надежность и пожаробезопасность электрооборудования.

Важным свойством кремнийорганических жидкостей является их гидрофобность, т.е. водоотталкивающая способность. Обработка фарфоровых, стеклянных или иных поверхностей изоляторов лаками на основе кремнийорганических жидкостей делает их поверхности не смачиваемыми. Это резко увеличивает их поверхностное сопротивление (в 1000 раз и более), что важно для районов с повышенной загрязненностью атмосферы.

Кремнийорганические жидкости используют в силовых трансформаторах, предназначенных для работ в пожароопасных условиях, в тяговых трансформаторах, на крупных морских судах и т.п., а также в импульсных трансформаторах, в силовых пленочных конденсаторах. Однако более широкому применению их мешает высокая стоимость.

Фторорганические жидкости. С химической точки зрения эти жидкости являются производными углеводородов, в которых атомы водорода частично или полностью заменены атомами фтора, например, $(C_4F_6)_8N$; $(C_4F_9)_2O$ и др.

Способы их получения сложны и требуют дорогих исходных продуктов и реактивов. Это определяет их высокую стоимость и ограничивает масштабы применения. Достоинствами фторорганических жидкостей является их большая химическая стабильность – до ~ 500 °С. Они негорючи, но летучи и впитывают влагу, поэтому применяются только в герметизированных конструкциях.

Некоторые фторорганические жидкости получили название хладонов (раньше их называли фреонами), поскольку нашли применение в холодильных установках в качестве хладагентов. Хладоны применяют для заполнения небольших трансформаторов и в других устройствах в тех случаях, когда другие виды жидких диэлектриков не выдерживают высоких рабочих температур.

Хладоны, имеющие невысокие температуры кипения (100...140 °С), применяются в силовых трансформаторах с испарительным охлаждением («кипящая изоляция»). Хладоны являются негорючими жидкостями, но их пары с воздухом взрывоопасны! Применяются хладоны в силовых трансформаторах для получения комбинированной изоляционной и теплоотводящей среды с использованием элегаза. Длительное время такие трансформаторы эксплуатируются, например, в США и Японии (их напряжение – 65...77 кВ, а мощность – 25...40 МВ·А).

Существуют синтетические жидкости практически нетоксичные, безопасные, такие как полибутены, например, октол $(C_4H_8)_n$ – непредельный углеводород. Свойства их очень стабильны. У пропитанных ими конденсаторов срок службы увеличивается в 2 раза и даже в 20...40 раз по сравнению с конденсаторами, пропитанными нефтяными маслами (табл. 4).

По имеющимся литературным данным цены на различные синтетические жидкие диэлектрики по отношению к цене на трансформаторное масло, принятой за единицу, составляют: для кремнийорганических жидкостей – 25...350; фтороорганических жидкостей с температурой кипения свыше 150 °С – 570...1150.

Таблица 4

Основные характеристики жидких диэлектриков

Наименование	Плотность 20 °С 10^3 кГ/м^3	Вязкость кинемат. при 20 °С, 10^{-6} м^2/с	t, °С, застывания	tgδ при 70 °С	ε	t, °С вспышки
Трансформаторное масло Т-750	0,895	30	–55	0,06	2,3	135
Конденсаторное	0,860	30÷45	–45	0,002	2,3	Не провер.
Кабельное МН-4	0,890	40	–45	0,002	2	165
Кабельное С 220	0,837	800	–30	0,002	2,25	180
«Калория 2» – кремнийорганическая жидкость	0,92	–от 10 до -250	-60	0,0002	2	300
Фенилксилэтан – фторорганическая жидкость	0.99	<30	–50	0,006	2,7	Негорюч.
Октол C_4H_3	0,870	300	–12	0,0013	2,3	165
Касторовое масло	0,96	130…300	–26	0,06	4,5	Не провер.

3.3. Твердые электроизоляционные материалы

Твердые материалы для электрической изоляции образуют самый многочисленный раздел диэлектриков. Наша задача рассмотреть наиболее типичные и широко распространенные из них, познакомиться с технологией получения, их составом и свойствами, а также областями применения в электротехнической промышленности.

Как известно, по своей химической природе все вещества разделяются на органические и неорганические. Органическими веществами называют такие, основой строения которых является углерод С, способный к образованию длинных цепочек. Сейчас известно более миллиона органических соединений, а химические вещества неорганического происхождения (не содержащие углерод) исчисляются всего лишь десятками тысяч.

В качестве электрической изоляции наибольшее распространение получила твердая органическая изоляция, относящаяся к группе полимеров.

В радио- и вычислительной технике полимеры занимают 90% всей применяемой изоляции. Такое широкое использование обусловливается достоинствами этих материалов. Для полимерных органических материалов благодаря их строению характерны гибкость, эластичность, легкость, негигроскопичность, высокие диэлектрические свойства. Они технологичны: процесс их получения полностью автоматизирован. Правда, им присущи и существенные недостатки: старение, горючесть.

Все атомы, входящие в состав макромолекулы полимера, соединены между собой ковалентными химическими связями. Эти соединения отличаются высокой химической стойкостью и высокими диэлектрическими свойствами. Однако межмолекулярное сцепление в них очень мало, это обусловливает высокую гибкость полимеров, но влечет за собой низкую механическую прочность, снижает температуру плавления (в случае кристаллического полимера) или размягчения (в случае аморфного полимера), придает веществу способность размягчаться в различных растворителях.

3.3.1. Состав и структурные формы полимеров

Исходными веществами для синтеза полимеров служат низкомолекулярные соединения – мономеры, являющиеся продуктами химической переработки нефти, природных газов или камнеугольных материалов. Соединяясь между собой, молекулы низкомолекулярных веществ становятся звеньями макромолекул полимера.

Таким образом, *полимеры* – это высокомолекулярные соединения, молекулы которых характеризуются многократным повторением одинаковых структурных звеньев, связанных между собой валентными связями. В молекулах мономеров содержится до 300 структурных звеньев, а в полимерах – от 10^3 до 10^6.

Существуют природные полимеры – это целлюлоза, а также смолы – шеллак, канифоль, каучук, янтарь и др. Некоторые из них и сейчас находят применение в электроизоляционной технике. Первые синтетические полимеры получены в начале XX века и также были названы смолами, поскольку по свойствам и признакам похожи на природные смолы. И сейчас в технической литературе ряд синтетических продуктов, особенно находящихся в высоковязком состоянии, сохранили название смолы. К ним относятся фенолоформальдегидные, глифталевые, эпоксидные смолы и др.

По структуре макромолекул полимеры делятся на 3 основные группы – линейные, разветвленные и пространственные – «сшитые». Молекулы линейных полимеров образуют цепи длиной $10^2...10^4$ нм, а шириной 0,3...1 нм. В цепях молекул разветвленных полимеров имеются ответвления. Пространственные (сшитые) полимеры характеризуются каркасным трехмерным строением. Сшивка (образование трехмерных связей) происходит либо в процессе получения полимеров, либо при определенных технологических операциях. Это воздействие определенных температур, воздействие химических агентов (вулканизация, отверждение) или ионизирующих излучений на заранее синтезированные линейные или разветвленные полимеры.

Молекулы линейных и разветвленных полимеров могут иметь упорядоченное расположение, т.е. образовывать кристаллическую фазу. Однако в процессе кристаллизации принимает участие лишь небольшое число звеньев из соседних молекул и размеры кристалликов (кристаллитов) во много раз меньше размеров самих молекул. Таким образом, между кристаллитами находится аморфная фаза. Соотношение кристаллической и аморфной фаз характеризует степень кристалличности полимера. Аморфные полимеры характеризуются отсутствием дальнего порядка в расположении макромолекул, хотя и в этом случае не являются полностью неупорядоченными.

Свойства линейных и пространственных полимеров существенно различны.

Линейные – гибкие, эластичные, при повышении температуры сохраняют линейное строение, размягчаются и расплавляются, не хрупки. Они называются *термопластичными*, или термопластами.

Пространственные полимеры при нагреве претерпевают необратимое изменение свойств, переходя в нерастворимое, нерасплавляемое состояние. Они приобретают значительную механическую прочность, твердость и нагревостойкость. При достаточно высоких (~ 200 °С и выше) температурах или открытом огне растрескиваются, обугливаются. Эти полимеры называются *термореактивными*, или реактопластами.

Большинство органических полимеров может длительно работать лишь, при температурах не выше 100 °С, т.е. относятся по нагревостойкости к классу Y или A. Выше этой температуры, как правило, происходит быстрое тепловое старение материала. Поэтому основной проблемой электроизоляционной техники всегда было

создание более нагревостойких материалов при сохранении у них гибкости, эластичности, высоких диэлектрических свойств, характерных для высокомолекулярных органических соединений.

Одним из решений этой проблемы является разработка элементоорганических полимеров.

Элементоорганическими называют такие полимеры, главная цепь которых не содержит атомов углерода, но к ней присоединяются органические группы. Наиболее распространенными среди этих полимеров являются кремнийорганические (полиорганосилоксаны). Они имеют в основной цепи вместо атомов углерода силоксановую связь $-Si-O-Si-O-Si-$.

Стремление создать еще более термостойкие полимеры привело к созданию новых, в которых органические звенья с ковалентными связями между атомами соединяются между собой с помощью ионов металлов, т.е. ионными связями.

Известны титанорганические полимеры $-Ti-O-Ti-$, алюминийорганические соединения, с основной цепью $-O-Al-O-Al-O$, а также элементоорганические полимеры олова, бора.

3.3.2. Методы получения полимеров

Процесс получения полимеров из мономеров происходит при химических реакциях полимеризации или поликонденсации.

Полимеризация – реакция, при которой полимер и мономер характеризуются одинаковым элементным составом, не происходит отщепление каких-либо низкомолекулярных побочных продуктов.

Поликонденсация – реакция, при которой происходит перегруппировка атомов полимеров, в результате чего выделяются побочные продукты: вода, низкомолекулярные вещества, соли, кислоты. Поэтому для полимеров, полученных путем поликонденсации, характерно несовпадение элементарного состава мономеров и получаемых на их основе полимеров. Различают следующие основные методы полимеризации: блочный и водно-эмульсионный.

1. **Блочный метод** полимеризации заключается в том, что мономер полимеризуют в чистом виде, без введения воды или растворителей.

После добавления необходимого количества инициатора или катализатора мономер нагревают и ход реакции контролируют, измеряя вязкость продукта и количество не вошедшего в реакцию мономера. В результате получают полимеры в виде «блоков» (застывшей массы) высокой степени чистоты, с хорошими электроизоляционными свойствами. Но такой полимер всегда содержит некоторое количество мономера, что приводит к неустойчивости его в эксплуатации (появлению трещин и т.д.).

Блочный метод полимеризации широко применяется при получении полистирола, полиметилметакрилата (органического стекла) и ряда других материалов.

2. При **водно-эмульсионном методе** полимеризации мономер полимеризуют в водной среде. Мономер загружают в автоклав и туда вводят примерно двойной объем воды, содержащей эмульгатор. Эмульгатор служит для лучшего распределения частиц мономера в воде, т.е. лучшего образования эмульсии.

После загрузки смесь тщательно перемешивают и добавляют катализатор. Реакция полимеризации протекает при нагреве до определенной для каждого мономера температуры и сопровождается незначительным выделением тепла. В результате реакции образуется твердый полимер, находящийся во взвешенном состоянии (в виде стойкой эмульсии). После окончания реакции и охлаждения смеси полимер выпадает из воды в виде твердого аморфного порошка.

Водно-эмульсионный метод полимеризации широко применяется для получения полимеров, используемых в технике, в виде пресспорошков, пластмасс, лаков и т.д.

В технике применяются различные методы поликонденсации: в расплаве, растворе, эмульсии, а также в твердой фазе.

1. Поликонденсацию в расплаве осуществляют обычно при 180...180 °С в атмосфере инертного газа. На конечной стадии в реакторе создают вакуум, что позволяет достичь наиболее полного удаления выделяющихся низкомолекулярных соединений. Поликонденсация в расплаве – основной промышленный способ линейной поликонденсации. Он используется, например, при синтезе некоторых полиэфиров, полиамидов и других полимеров.

2. Поликонденсация в растворе широко применяется в промышленности для получения полимеров различных классов. Особенно интенсивное развитие этот метод получил в последние годы в

связи с необходимостью получения высокомолекулярных или высокоплавких полимеров, которые невозможно синтезировать в расплаве. Этот метод применяется, например, при получении поликарбонатов, полиимидов и др.

3. Эмульсионная полнконденсация протекает в двухфазных системах, в которых реакционной зоной является одна из фаз. В этом случае, несмотря на гетерогенность системы, поликонденсация проходит в капле одной из фаз как в растворе. Этим методом получают, например, ароматические полиамиды, полиэфиры, поликарбонаты.

4. Полнконденсация в твердой фазе проводится путем нагревания тонкоизмельченных и смешанных мономеров длительное время при повышенной температуре, но ниже температуры плавления образующегося мономера, обычно при 150...400 °С. Твердофазные процессы распространены в химии и технологии неорганических полимеров (керамика, огнеупоры). В некоторых случаях твердофазная поликонденсация протекает в твердых (или почти твердых) смесях, которым придана форма будущего изделия (реакционное формование).

Твердофазной поликонденсацией и, в частности, реакционным формованием получают, например, некоторые неплавкие и нерастворимые (хотя и линейные) высокотермостойкие полимеры, такие как полиимиды и другие с длительной температурой эксплуатации (250 °С и выше).

3.3.3. Полимеры с малыми диэлектрическими потерями (неполярные)

У неполярных полимеров мономерные звенья макромолекул не обладают дипольным моментом. Из неполярных полимеров наиболее важное техническое значение как электроизоляционные материалы имеют полиэтилен, полистирол, политетрафторэтилен (фторопласт), получаемые реакцией полимеризации.

Эти материалы имеют низкий tgδ, поэтому являются основной высокочастотной изоляцией для радиотехнических устройств.

Полиэтилен – это продукт полимеризации этилена (C_2H_4), получаемого главным образом при крекинге нефти. Промышленное производство полиэтилена началось в 1941 г.

Полиэтилен можно было получить только при весьма высоких давлениях (до 300 МПа) и температурах порядка 200 °С. Такой полиэтилен называют полиэтиленом высокого давления (ПВД). Лишь в 1954 г. был открыт способ промышленного получения полиэтилена при давлениях, близких к атмосферному, и температурах порядка 100 °С в присутствии некоторых титано- и алюминийорганических соединений в качестве катализаторов. Такой полиэтилен называется полиэтиленом низкого давления (ПНД). Полиэтилен является одним из самых легких полимеров, его удельный вес колеблется от 0,92 до 0,96 г/см^3. При обычной температуре он состоит примерно на 75% из кристаллической фазы и на 25% из аморфной. Аморфная фаза обеспечивает гибкость и эластичность его при весьма низких температурах (–65 °С). Таким образом, полиэтилен обладает хорошей морозостойкостью. ПВД размягчается при температуре 105...120 °С, ПНД – при температуре 130...140 °С. Полиэтилен обладает высокой озоностойкостью.

Полиэтилен растворяется во многих углеводородах (бензин, бензол, толуол и др.) при температурах выше 70 °С. При температурах ниже 70 °С он практически не растворяется ни в каких растворителях и на него не действует большинство кислот. Водопоглощаемость полиэтилена очень мала, поэтому он является лучшим изоляционным материалом для подводных кабелей. Полиэтилен является неполярным диэлектриком и обладает очень высокими электроизоляционными свойствами (см. табл. 5). Поэтому он может применяться как электроизоляционный материал при любых частотах.

Недостатки полиэтилена: старение под действием тепла и света, горючесть, малая твердость и низкая температура размягчения. Для устранения этих недостатков применяются различные способы.

Стабилизированный полиэтилен содержит в своем составе антиокислители (стабилизаторы), которые вводятся в него при изготовлении. Это ароматические вещества, между бензольными кольцами которых содержатся –NH–. В результате процесс теплового старения замедляется в десятки раз и свойства полиэтилена в условиях нагрева остаются более стабильными.

Для повышения стойкости полиэтилена к воздействию ультрафиолетовых лучей, под действием которых он растрескивается и становится более хрупким, в него вводят газовую сажу (примерно 2%), которая поглощает ультрафиолетовые лучи.

Негорючий полиэтилен. Добавление к полиэтилену трехокиси сурьмы делает его негорючим; для того чтобы устранить возникшую при этом хрупкость, в него вводится также негорючий пластификатор, например, хлорированный парафин. По своим физико-механическим свойствам негорючий полиэтилен несколько хуже обычного.

Облученный полиэтилен. Для повышения твердости и температуры размягчения полиэтилен подвергают воздействию мощного источника излучения (нейтроны, электроны, гамма- или бета-лучи). При этом в полиэтилене происходит образование поперечных связей «сшивка» (за счет разрыва имеющихся в нем в небольшом количестве двойных связей). Образование пространственной структуры сопровождается значительным повышением температуры размягчения, полиэтилен становится более твердым и полностью нерастворимым. Пленки из облученного полиэтилена могут длительно эксплуатироваться при температурах 100...110 °С и кратковременно при температурах до 220 °С.

Применение полиэтилена. Полиэтилен широко применяется в различных отраслях техники: в химической промышленности для изготовления резервуаров, труб, бутылей; в электротехнической промышленности для изоляции проводов и кабелей, для изготовления защитных оболочек, тонких пленок для конденсаторов.

Полиэтилен может перерабатываться всеми известными способами, но чаще всего применяется литье под давлением и непрерывное выдавливание (изготовление изоляции кабелей). Он хорошо обрабатывается также механически на различных станках; сваривается, например, в струе инертного газа при температуре около 300 °С, при этом прочность получаемого шва не уступает прочности самого материала.

Приблизительно 15...18% всего производимого за рубежом полиэтилена потребляется кабельной промышленностью. Это объясняется тем, что кабели с полиэтиленовой изоляцией отличаются гибкостью, не нуждаются в металлических герметизирующих оболочках, имеют малый вес.

Процесс изготовления кабелей с полиэтиленовой изоляцией проще, чем кабелей с бумажной пропитанной изоляцией, так как отпадают длительные операции сушки и пропитки. Силовые кабели с полиэтиленовой изоляцией целесообразно применять на крутонаклонных и

вертикальных участках трассы, где применение кабелей с бумажной изоляцией затруднено вследствие стекания пропиточной массы из-за значительных разностей уровня.

В настоящее время силовые кабели с полиэтиленовой изоляцией выпускаются во многих странах на напряжения до 400 кВ. Полиэтилен применяется для городских телефонных сетей, различных высокочастотных кабелей, а также магистральных кабелей для передачи на дальние расстояния телевизионных программ и осуществления многоканальной телефонной связи, в том числе и подводной.

Облученный в деформированном растянутом состоянии полиэтилен (и некоторые другие полимеры) обладают весьма интересной способностью. При умеренном нагреве они восстанавливают форму и размеры изделия, которые существовали до облучения. Это явление называется *термоусадкой* и успешно используется в электроизоляционных трубках и муфтах, герметичных покрытиях обмоток. Такие изделия после монтажа и последующего нагрева дают заметную усадку, и изоляция плотно обжимает проводники, находящиеся внутри нее. Намотка из нескольких слоев облученной полиэтиленовой пленки после термоусадки становится практически монолитной, так как отдельные слои плотно соединяются друг с другом. В настоящее время термоусаживаемая технология широко применяется при изготовлении кабельных муфт.

Полистирол получается в результате полимеризации стирола (C_6H_8), представляющего собой легкую бесцветную жидкость. Реакция полимеризации легко протекает при постепенном нагреве до 80...100 °С.

В зависимости от способа полимеризации полистирол получается или в виде блоков (пластин, брусков, стержней и т.д.), или в виде тонкодисперсного порошка, удобного для дальнейшей переработки (при эмульсионном способе получения).

Полистирол, полученный методом блочной полимеризации, имеет более высокие электроизоляционные свойства, но более склонен к растрескиванию, чем эмульсионный полистирол.

По своим электроизоляционным свойствам полистирол относится к наиболее совершенным диэлектрикам и уступает в этом отношении лишь полиэтилену и фторопластам. Он обладает практически абсолютной водостойкостью и хорошей химической стойкостью к кислотам и щелочам. Полистирол растворяется в

ароматических углеводородах (бензоле, толуоле), четыреххлористом углеводороде и других, не растворяется в спиртах, парафиновых и нафтеновых углеводородах, растительном масле.

Из плат или блоков полистирола можно изготовлять различные детали методами механической обработки, так как он хорошо обрабатывается на различных станках, легко сверлится и режется пилой. Необходимо только следить, чтобы скорости обработки были небольшими и не вызывали нагрева полистирола, так как при этом он размягчается и легко деформируется.

Важнейшей областью потребления полистирола является радиотехническая промышленность, где он используется для изготовления различных деталей и изоляции высокочастотных кабелей.

Методом выдавливания из полистирола получаются пленки и нити (общее название их – стирофлекс). Нити и пленки применяются для изоляции специальных конструкций кабелей дальней связи. Кроме того, пленки применяются в производстве электрических конденсаторов. Электрическая прочность таких пленок составляет 110 кВ/мм, $tg\delta$ – не более $4 \cdot 10^{-4}$ при 1 МГц.

Рабочая температура изделий не должна превышать 80 °С.

Полистирол применяется также для изготовления изоляционных лаков и компаундов, хотя последние и дают большую (до 18%) усадку.

Основным недостатком полистирола, сильно ограничивающим его практическое применение, является низкая нагревостойкость (класс Y).

Фторопласты. Среди многочисленных синтетических материалов особый интерес представляют фторорганические электроизоляционные материалы. Большинство материалов этой группы обладает прекрасными электроизоляционными характеристиками, очень высокой нагревостойкостью, значительной морозостойкостью, влагостойкостью и устойчивостью к действию химических веществ. Эти свойства делают их незаменимыми при изготовлении изоляции электро- и радиотехнического оборудования, предназначенного для работы в особо тяжелых условиях. Важнейшими представителями материалов этой группы являются неполярный фторопласт-4 (иностранное название - тефлон) и фторопласт-3 – полярный диэлектрик.

Фторопласт-4 (получен впервые в 1942 г.) представляет собой продукт полимеризации тетрафторэтилена $(CF_2)_n$ в присутствии инициатора при умеренных давлениях.

Полимеризация проводится в автоклавах из нержавеющей стали в водной среде и сопровождается большим выделением тепла. Полимер получается в виде белого порошка, который затем промывается и высушивается.

В отличие от рассмотренных ранее полимеров фторопласт-4 не содержит водорода, который в нем полностью замещен атомами фтора. Наличие сильной связи C-F и очень компактная упаковка цепей молекул обеспечивают фторопласту-4 высокую нагревостойкость, полную нерастворимость и химическую стойкость.

Фторопласт-4 имеет ярко выраженную кристаллическую структуру строения (при комнатной температуре он содержит около 70% кристаллической фазы). Он является одним из самых нагревостойких полимеров; термическое разложение его начинается при температурах около 350 °С и сопровождается выделением фтора. Даже при температуре жидкого гелия (–269,3 °С) он не становится хрупким.

Фторопласт-4 имеет очень высокую химическую стойкость, по которой превосходит все известные материалы, в том числе золото и платину. Он стоек против всех кислот, растворителей и окислителей и разрушается только расплавленными щелочными металлами и элементарным фтором, не смачивается водой и при длительном нахождении в воде (без ограничения срока) не обнаружено увеличения веса образца. До настоящего времени не известен ни один растворитель, в котором фторопласт хотя бы набухал. Поэтому применение фторопласта-4 в виде лаков исключено.

Фторопласт-4 является неполярным диэлектриком и его электроизоляционные свойства очень высоки (см. табл. 5), не зависят от температуры и частоты в очень широких пределах. Поэтому он может применяться как диэлектрик при любых частотах, вплоть до сотен и тысяч мегагерц, в широком диапазоне температур (от –200 до +250 °С).

Фторопласт-4 термопластичен, но даже при температурах выше температуры плавления (327 °С) он имеет незначительную текучесть, поэтому к нему не могут быть применены методы, используемые обычно при переработке других полимеров (литье, выдавливание и т.д.).

Основным методом переработки фторопласта-4 является прессование заготовок или изделий из мелкодисперсного порошка при давлении 300...400 кг/см^2. После прессования производится их

спекание при температуре порядка 375 °С (без давления) для получения плотной, однородной массы; при полном спекании материал становится совершенно прозрачным. Спекание толстостенных и крупных изделий во избежание образования трещин производится в формах под давлением.

В настоящее время из фторопласта-4 изготовляются тонкие пленки, которые широко применяются в качестве изоляции электрических конденсаторов и кабелей.

Для повышения электрической и механической прочности пленки ее подвергают прокатке на точных прокатных станках. При прокатке пленка получает остаточные деформации и происходит ее ориентация; длина ее увеличивается, а толщина соответственно уменьшается.

При нагреве ориентированной пленки происходит ее усадка. Эта способность давать усадку при нагреве, «термоусаживаемость», используется при изготовлении пленочной изоляции проводов, кабелей или конденсаторов, так как последующее нагревание и усадка пленки приводят к уплотнению обмотки, и она становится совершенно влагонепроницаемой.

Применение изоляции из фторопласта-4 позволяет повысить рабочую температуру электрических машин, трансформаторов, конденсаторов и других изделий до 200...250 °С, что обеспечивает значительное уменьшение их размеров и расширяет область применения. Конденсаторы с изоляцией из фторопласта имеют, кроме того, очень высокую постоянную времени (порядка 10^6...10^7 с при 20 °С вместо 10^4 с для доброкачественных бумажных конденсаторов), что дает возможность применять такие конденсаторы вследствие малого tgδ в различной высокочастотной аппаратуре при повышенных температурах, так как при температурах порядка 200 °С другие типы конденсаторов, например, керамические, ведут себя ненадежно.

Из фторопласта-4 изготовляются также различные химически стойкие детали: трубы, шланги, вентили, насосы, сальники и т.д., предназначенные для работы в любых наиболее агрессивных средах (кислотах, щелочах и т.д.) при температурах от –200 до +250 °С.

Недостатками фторопласта-4 являются:

1. Текучесть на холоде под нагрузкой свыше 30 кг/см^2.

2. Появление токсичности при температурах свыше 350 °С вследствие разложения и выделения фтора.

3. Сложность производства и высокая стоимость.

Все неполярные полимеры характеризуются небольшой диэлектрической проницаемостью, малыми диэлектрическими потерями в диапазоне радиочастот, высокой электрической прочностью и весьма высоким удельным сопротивлением. Диэлектрическая проницаемость неполярных полимеров в основном определяется *электронной поляризацией*. Поэтому значение ε не зависит от частоты и слабо уменьшается с повышением температуры, что находится в соответствии с уменьшением плотности полимера при нагревании.

Благодаря высокому удельному сопротивлению потери на электропроводность в рассматриваемых материалах при нормальных условиях играют далеко не главную роль. Расчет потерь на электропроводность по формулам

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{R \cdot \omega C} \quad \text{или} \quad \operatorname{tg}\delta = \frac{1{,}8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon f \cdot \rho},$$

где f – частота, Гц; ρ – в Ом·м

с использованием значений ε и ρ из табл. 3 дает для частоты 10^6 Гц $\operatorname{tg}\delta \approx 10^{-10} \ldots 10^{-12}$, что ничтожно мало по сравнению с экспериментальными значениями этого параметра. Отсюда можно сделать вывод, что даже в неполярных полимерах главными являются релаксационные потери, хотя они и малы.

Во всех линейных полимерах различают два типа релаксационных потерь: дипольно-сегментальные и дипольно-групповые. Первый тип можно представить как изгибные колебания основной молекулярной цепи. Второй тип релаксационных потерь обусловлен вращением малых полярных групп, которые часто содержатся в боковых ветвях макромолекулы.

Диэлектрические потери в неполярных полимерах очень чувствительны к полярным примесям, таким как гидроксильные (OH) или карбонильные (CO) группы, которые всегда присутствуют в технических материалах вследствие частичного окисления, захвата катализатора полимеризации и других причин. Тщательной очисткой материала удается снизить релаксационные потери и достигнуть значений $\operatorname{tg}\delta \approx 10^{-4}$ (табл. 5).

Таблица 5

Основные свойства неполярных полимеров

Свойства	Полиэтилен	Полистирол	Фторопласт-4
Удельное объемное сопротивление, Ом·м	$10^{14}...10^{15}$	$10^{14}...10^{16}$	$10^{14}...10^{16}$
Относительная диэлектрическая проницаемость	2,3...2,4	2,5...2,6	1,9...2,2
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^6 Гц	0,0002... 0,0005	0,0002... 0,0004	0,0002... 0,0003
Электрическая прочность, МВ/м	40...150*	20...110*	40...250*
Нагревостойкость, °С	105...130	75...80	~300

* Верхние пределы для материалов в виде пленки.

3.3.4. Полимеры с повышенными диэлектрическими потерями (полярные)

Несимметричное строение молекул полярных полимеров обусловливает в них повышенное значение диэлектрических потерь, особенно на высоких частотах. Однако многие из них все же имеют необходимые электрические характеристики и широко применяются в качестве электроизоляционных материалов для установок низких и повышенных частот.

Кроме того, по механической прочности, нагревостойкости, химической стойкости, а также по технологии получения и стоимости многие из полярных полимеров имеют преимущества перед неполярными.

Полярные полимеры получаются как реакцией полимеризации (фторопласт-3, поливинилхлорид и др.), так и реакцией поликонденсации (полиамиды, полиимиды, эпоксидные смолы и др).

Фторопласт-3 (политрифторхлорэтилен) является продуктом полимеризации трифторхлорэтилена $CF_2 = CFCl$. Молекулы его имеют несимметричное строение из-за большого размера атомов хлора, по сравнению с атомами фтора. Поэтому фторопласт-3 полярный диэлектрик.

При нагревании выше 210 °С фторопласт-3 переходит в высокоэластичное состояние, а затем в вязкотекучее. При нагревании выше 310 °С он начинает разлагаться с выделением фтора и хлора. Процесс разложения ускоряется при контакте с металлами (медь, железо).

По химической стойкости он уступает несколько фторопласту-4, но превосходит все остальные полимеры. Радиационная стойкость фторопласта-3 выше, чем у фторопласта-4. Фторопласт-3 не смачивается водой и совершенно в ней не набухает, водопоглощаемость его равна нулю. Фторопласт-3 значительно дешевле фторопласта-4.

Фторопласт-3 выпускается в виде порошка и применяется для получения антикоррозийных покрытий, изоляции проводов и кабелей.

Так как фторопласты при нагревании разлагаются с выделением весьма ядовитых соединений, при работах с ними необходимо соблюдать правила техники безопасности.

Поливинилхлорид (ПВХ) получается путем полимеризации газообразного хлористого винила (винилхлорида): $[CH_2CH\text{-}CL]_n$.

Хлористый винил в технике получается различными методами, например, путем действия на ацетилен хлористым водородом.

Реакция полимеризации легко протекает в водном растворе при температуре 40...60 °С, давлении 1...2 МПа в присутствии инициатора – перекиси водорода. После осаждения и отделения от воды получается мелкодисперсный белый аморфный порошок поливинилхлорида. При температуре выше 140 °С он начинает разлагаться, что легко заметить по потемнению полимера.

С физиологической точки зрения ПВХ совершенно безвреден. Вредное действие оказывают продукты разложения ПВХ: хлористые соединения, *H*CL, CO и др.

При получении материалов из ПВХ обычно применяют пластификаторы. В зависимости от количества и вида введенного пластификатора и характера переработки из ПВХ получают электроизоляционные материалы: винипласты, пластикаты, а также пенопласты и лаки.

При термической обработке поливинилхлорида с добавками 2–3%, обычно солей свинца, мыл Ba, Ca и других на вальцах при температуре 160...170 °С получается пленка толщиной 0,2...1 мм. Путем горячего прессования из пленки получают листовой поливинилхлорид – *винипласт* – толщиной от 2 до 20 мм.

Винипласт представляет собой жесткий, твердый пластик. Он обладает высокой химической стойкостью к действию солей, щелочей и кислот (за исключением концентрированных); растворяется только в ароматических и хлорированных углеводородах (ацетоне, дихлорэтане и др.).

Изделия из винипласта можно изготовить методом горячего прессования, штамповкой и формовкой как при комнатной температуре, так и при нагреве до 60...80 °С. Он также хорошо обрабатывается механически (сверлится, пилится, фрезеруется и т.д.) и хорошо сваривается при температуре 180...200 °С.

Винипласт обладает хорошими дугогасящими свойствами, поэтому его применяют как дугогасящий материал в различных устройствах. Он широко применяется также как антикоррозийный и конструкционный материал для работы при температурах до +40 °С. Из него изготавливают резервуары для хранения кислот и щелочей, аккумуляторные баки, различные изоляционные детали.

Для повышения морозостойкости и улучшения эластичности поливинилхлорида в него вводят пластификаторы – фосфаты, хлорпроизводные нафталина, синтетические каучуки и др.

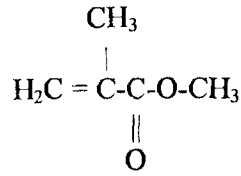
Такой пластифицированный поливинилхлорид называется *пластикатом.* Он выпускается промышленностью в виде пленок, плит, листов различной толщины, крошки и т.д. и имеет морозостойкость до –40 °С (в некоторых случаях даже до –60 °С).

Он широко применяется в производстве различных кабельных изделий и проводов в качестве изоляции, а также для изготовления защитных оболочек кабелей заменяя при этом дефицитный свинец.

Длительная работа кабелей и проводов с поливинилхлоридной изоляцией допускается при температуре до 80 °С.

Электроизоляционные характеристики поливинилхлорида вследствие полярного строения его молекул имеют большую зависимость от частоты, например, диэлектрические потери при частоте 10^6 Гц достигают 0,05...0,1 вместо 0,01...0,02 при 50 Гц. Поэтому поливинилхлорид для работы на повышенных частотах неприменим.

Полиметилметакрилат. Исходным продуктом для получения этого полимера служит метилметакрил – органическая кислота, имеющая строение



Это жидкость с температурой кипения 100, 3 °С.

В результате полимеризации метилметакрилата получается термопластичный полимер в виде бесцветных листов, блоков или заготовок, растворимый в органических растворителях, но не растворимый в воде. Полимер обладает высокой прозрачностью даже при значительной толщине (несколько десятков сантиметров), поэтому его часто называют органическим стеклом, плексигласом.

Полиметилметакрилат является полярным диэлектриком, и его электроизоляционные свойства невысоки (см. табл. 6), зависят от частоты и температуры. При температурах свыше 80 °С tgδ резко увеличивается, а ρ_v уменьшается. Поэтому как диэлектрик он находит ограниченное применение.

Используется в технике также и высокая прозрачность полиметилметакрилата. Его преимуществом по сравнению с силикатным стеклом является лучшая способность пропускать ультрафиолетовую часть спектра. Например, по сравнению с кварцевым стеклом силикатное пропускает 0,6% ультрафиолетовых лучей, а полиметилметакрилат – 73,5%.

Основным свойством полиметилметакрилата является способность разлагаться под действием электрической дуги с выделением большого количества газообразных продуктов. Поэтому он применяется главным образом как дугогасящий материал в отключающей аппаратуре.

Поверхность полиметилметакрилата легко царапается, при температурах свыше 60 °С он размягчается – эти недостатки и ограничивают применение его для изготовления оптических изделий.

Из него изготавливают защитные смотровые стекла различных аппаратов и приборов.

Поливинилацетали получаются реакцией полимеризации при взаимодействии поливинилового спирта $[-CH_2-CH(OH)-]_n$

с различными альдегидами (CH_2O и др.), куда вводят также катализатор (серную кислоту).

Реакция протекает при нагревании смеси до температуры 60...80 °С и энергичном перемешивании. Поливинилацетали являются термопластичными материалами, отличаются высокой механической прочностью и маслостойкостью, свойства их стабильны и при низких температурах (до –40 °С).

Поливинилацеталь, полученная из поливинилового спирта при введении масляного альдегида, называется поливинилбутиралем (бутвар). Бутвар применяется для производства пластмасс, из него, в частности, изготовляются пленки, используемые в производстве многослойного стекла.

Поливинилацетали применяются для получения электроизоляционных лаков, известных под названием металвин и винифлекс. Особенностью этих лаков являются повышенная механическая прочность лаковой пленки, стойкость к истиранию, высокая адгезия к стеклам, металлам, атмосфероустойчивость. Эти лаковые пленки обладают газопроницаемостью в 15...20 раз меньшей, чем пленки из резины или натурального каучука.

Поливинилацеталевые лаки широко применяются для изготовления эмалированных обмоточных проводов. Вследствие высокой механической прочности лаковой пленки и высокой ее стойкости к истиранию провода с поливинилацеталевой изоляцией можно применять не только для изготовления катушек приборов и аппаратов, но и для обмоток вращающихся частей электрических двигателей без волокнистой дополнительной изоляции. Это позволяет значительно увеличить коэффициент заполнения паза по меди и сократить габариты электрических двигателей на 10...20% или при прежних габаритах повысить мощность электродвигателей на 15%.

При замене каждых 10000 т эмальпроводов с масляной изоляцией и с дополнительной обмоткой из хлопчатобумажной пряжи на новые провода с полимерной изоляцией сокращается расход растительных масел на 400 т, хлопчатобумажной пряжи на 380 т, меди на 800 т. Однако нагревостойкость их невысока и длительно допустимый нагрев проводов с изоляцией из поливинилацеталей не должен превышать 110 °С, т.е. они относятся к классу нагревостойкости А.

При получении полимеров по реакции поликонденсации часто на первых ее стадиях получаются промежуточные продукты –

олигомеры. По степени полимеризации, молекулярной массе и вязкости они схожи с натуральными смолами. Они легко растворяются в различных растворителях, образуя лаки (клеи). Путем дальнейшего нагревания с катализатором или без него происходит дополнительная полимеризация и получается окончательный продукт – высокомолекулярный полимер. За такими материалами сохранилось название смолы.

Одними из наиболее ранних синтезированных по методу поликонденсации таких полимеров являются фенолоформальдегидные и полиэфирные смолы.

Фенолоформальдегидные смолы получены в 30 гг. XX столетия путем поликонденсации фенола C_6H_5-OH (карболовая кислота) или его гомогенов с формальдегидом H_2CO в присутствии катализатора.

Фенолоформальдегидные смолы могут быть как термореактивными, так и термопластичными. Это зависит от соотношения исходных компонентов и типа катализатора. При применении щелочного катализатора (аммиака) получается термореактивная *смола – бакелит*. При этом наблюдаются характерные стадии.

На первой стадии А (бакелит) смола представляет смесь олигомеров, размягчается при температурах 55...85 °С и легко растворяется в спирте, образуя бакелитовый лак (клей). Бакелит А применяется для пропитки дерева, тканей, бумаги, при изготовлении слоистых пластиков – гетинакса, текстолита. При дальнейшем нагревании при температурах 110...140 °С происходит дополнительная полимеризация бакелита с образованием трехмерного строения молекул и переход его в неплавкое и нерастворимое состояние (запекание). В этой конечной стадии бакелит С термореактивен, он не растворяется ни в спирте, ни в других растворителях, а при нагревании до высоких температур может лишь обуглиться и сгореть.

Если при поликонденсации фенола и формальдегида взять иное соотношение компонентов и кислотный катализатор (соляную кислоту), то получится фенолоформальдегидная смола с линейным строением молекул, называемая *новолак*. Новолак – типичная термопластичная смола: сохраняет гибкость при нагреве и растворяется в спиртах, образуя лаки (клеи).

Широкое техническое применение фенолоформальдегидные смолы нашли в производстве электротехнических лаков, клеев, различных пластмасс (фенопластов), а также слоистых пластмасс – гетинакса и текстолита.

Наличие в молекулах фенолоформальдегидных смол гидроксильных групп –ОН делает эти смолы полярными. Вследствие этого электрические свойства их невысоки и они применимы как низкочастотные диэлектрики.

Нагревостойкость 100...120 °С. Недостатком изделий из этих смол является тот факт, что под влиянием электрических разрядов на поверхности их образуются проводящие науглероженные следы.

Полиэфирные смолы. Они представляют собой продукты поликонденсации различных спиртов и органических кислот. Они весьма многочисленны и разнообразны по свойствам. Полиэфирной смолой, синтезированной впервые, в 30-х годах XX столетия, является *глифталевая смола.* Она получается реакцией поликонденсации глицерина $CH_2OH\text{-}CHOH\text{-}CH_2OH$ и фталевого ангидрида (продукта окисления нафталина) $C_8H_4O_3$.

Глифталевая смола термореактивна, но для ее запекания требуется более высокая температура и большее время по сравнению с бакелитом.

Преимуществами глифталя перед бакелитом являются большая гибкость, более высокая эластичность и стойкость к действию поверхностных электрических разрядов. Незапеченный глифталь растворяется в ацетоне и других органических растворителях. После запекания он очень стоек к действию самых разнообразных растворителей. Глифталь широко применяется в виде лаков для пропитки изоляции электрических машин и аппаратов, особенно работающих в трансформаторном масле при температурах от –60 до +120 °С.

Важное значение глифталевые смолы имеют в производстве слюдинитов благодаря высокой клеящей способности, теплостойкости и хорошим электроизоляционным свойствам. Слюдиниты на глифталевой основе по сравнению с слюдинитами на основе бакелита более гибки и эластичны, имеют лучшие электроизоляционные и термические характеристики.

Широкое применение в настоящее время находит термопластичная смола, получившая название полиэтилентерефталат (*лавсан*). Лавсан получается в результате реакции поликонденсации гликоля $HO\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}OH$ и терефталевой кислоты $HOOC\text{-}C_6H_4\text{-}COOH$ без растворителей и катализаторов при температуре 280 °С в течение 8...10 часов в атмосфере азота. Он имеет линейную структуру, не содержащую боковых ветвей, что способствует плотной упаковке молекул. Кристаллическая фаза составляет 65...75% полимера.

Являясь термопластичным материалом, лавсан хорошо перерабатывается методами прессования, вальцевания и выдавливания.

Лавсан плавится при температуре 240...260 °С, а при 300 °С начинается его разложение. Он применяется как пластмасса для изготовления различных нагруженных конструкционных деталей (шестерни, корпуса и т.д.) вместо металла, для изготовления разнообразных электроизоляционных изделий, а также в виде прокладок, труб и поделочного материала.

Из лавсана изготовляются волокна, которые применяются для оплетки проводов повышенной нагревостойкости, и пленки. Значение пленок из лавсана для электроизоляционной техники очень велико, так как они обладают весьма высокой электрической прочностью и нагревостойкостью – до класса Н. В отношении нагревостойкости они превосходят все остальные синтетические пленки и уступают только пленкам из фторопластов. Пленки из лавсана используют в качестве несущей основы при изготовлении ленты магнитной записи. Такие пленки для межслойной изоляции в обмотках трансформаторов, дросселей и других рассчитаны на рабочую температуру от –60 до +150 °С.

Полиэфиры угольной кислоты (поликарбонаты) являются одним из видов полиэфирных смол. Известно большое количество полимеров этой группы.

Поликарбонаты являются термопластичными материалами, температура плавления их лежит выше 220 °С.

Из поликарбонатов изготовляются пленки, которые благодаря своим высоким электроизоляционным свойствам, нагревостойкости и химической стойкости находят широкое применение.

Электрическая прочность поликарбонатных пленок очень высока и составляет при нормальной температуре 150...170 кВ/мм. Остальные электрические характеристики также достаточно высоки.

По нагревостойкости поликарбонатные пленки относятся к классу Е (допустимая температура 120 °С).

Поликарбонатные пленки применяются для изготовления изоляции конденсаторов и электрических кабелей сверхвысоких напряжений.

Создание кабелей на напряжения 330...500 кВ затрудняется в частности тем, что максимальные напряженности бумажно-масляной изоляции не могут быть выше 12...15 кВ/мм. Это объясняется

значительной разницей диэлектрической проницаемости бумаги и масла $\left(\frac{\varepsilon_{бум}}{\varepsilon_{м}} > 1\right)$. Применение вместо бумаги синтетических пленок позволяет повысить максимальную рабочую напряженность изоляции кабеля, так как вследствие меньшей диэлектрической проницаемости указанных пленок, приближающейся к диэлектрической проницаемости масла $\left(\frac{\varepsilon_{пл}}{\varepsilon_{м}} \approx 1\right)$, напряженность поля в масле снижается.

Наиболее подходящими для этих целей являются пленки из полистирола и поликарбонатов.

Исследования электрической прочности кабельной изоляции из поликарбонатных пленок и масла показали, что напряжение начала ионизации для нее более чем в два раза превышает это напряжение для бумажно-масляной изоляции, а tgδ изоляции не зависит от напряженности поля вплоть до 50 кВ/мм. Поэтому комбинированная изоляция из синтетических пленок и масла сможет выдерживать напряжения в 1,5...2 раза превышающие допустимые для бумажно-масляной изоляции.

Поликарбонаты могут также применяться для изготовления литых электроизоляционных изделий.

Полиэфирные смолы применяются также при производстве стеклотекстолита в качестве связующего.

Полиамиды. Обычно используемые полиамиды (ПА) – полимеры линейного строения, содержащие в основной цепи макромолекулы амидные группы (–CO–NH–). Такие ПА получают поликонденсацией или полимеризацией.

ПА (полученные поликонденсацией двух или более компонентов) обладают большой эластичностью. Волокна и пленки, полученные из них, обладают большой прочностью при растяжении (300...400 МПа), твердостью.

В электрической изоляции ПА применяются для изготовления прессованных и литых деталей, а также в производстве изоляции обмоточных проводов и лакотканей.

Особенно широко известными и применяемыми полиамидами являются *капрон, нейлон, энант.* Капрон благодаря хорошим

термопластичным свойствам и высокой механической прочности используют в производстве различных конструкционных деталей радиоаппаратуры (корпусы приборов, ручки и кнопки управления, клавиатура, каркасы индуктивных катушек и т.д.).

В настоящее время в электротехнической промышленности широко используются электроизоляционные материалы на основе ПА, например, материал, известный под названием *фенилон.*

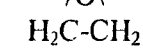
Для фенилона, как и для других ароматических ПА, характерны достаточно высокая (до 220 °С) температура длительной эксплуатации, повышенная радиационная и химическая стойкость и другие ценные свойства.

Фенилон представляет собой аморфный полимер, который при последующем нагревании при 340...360 °С быстро кристаллизуется; при более низких температурах кристаллизация происходит при длительном нагревании.

Он растворим лишь в концентрированной серной, хлорсульфоновой кислотах.

Фенилон предназначается главным образом для изготовления волокон и волокнистых полимерных связующих для электроизоляционных бумаг и картонов.

Эпоксидные смолы. Они характеризуются наличием в их составе эпоксидных групп (колец)



В исходном состоянии эти смолы имеют линейные молекулы и представляют собой вязкие жидкости, растворяемые в ацетоне. После добавления к ним «отвердителей» (некоторые азотсодержащие органические соединения) эпоксидные смолы приобретают пространственное строение. Важно то, что процесс отверждения в данном случае представляет собой чистую полимеризацию без протекания реакций конденсации, т.е. без выделения воды или других низкомолекулярных веществ. Поэтому эпоксидные смолы, являясь термореактивными материалами, могут равномерно отверждаться в толстом слое, образуя при этом весьма водонепроницаемую изоляцию.

Необходимо отметить, что все электрические характеристики после длительного нахождения эпоксидной изоляции в воде меняются

незначительно. Например, tgδ эпоксидной изоляции после нахождения в воде в течение 250 суток увеличился с 0,01 до 0,015, а электрическая прочность практически не изменилась.

Большим преимуществом эпоксидных смол является также их весьма высокая склеивающая способность (адгезия) по отношению ко многим материалам – пластическим массам, стеклу, металлам и др. Отвержденные эпоксидные смолы обладают довольно высокой нагревостойкостью, в ряде случаев могут заменить более дорогие кремнийорганические смолы, но обладающие невысокими механическими характеристиками.

Эпоксидные смолы в чистом виде или в композиции с другими материалами с успехом применяются для изготовления лаков и клеев, заливочных компаундов (например, для заливки небольших трансформаторов).

Пробивные напряжения обмоток, трансформаторов залитых эпоксидным компаундом, на 10...20% выше пробивных напряжений обмоток, пропитанных маслом.

Литая изоляция на основе эпоксидных смол практически негорюча, при искусственном поджигании она не поддерживает горения, имеет очень высокую водостойкость, поэтому аппаратура с эпоксидной изоляцией может устанавливаться и на открытом воздухе, в условиях повышенной влажности и даже работать, находясь в воде.

Полиимидные смолы. Большим достижением в области получения полимерных материалов является синтез полиимидов (ПИ). Полиимиды получены реакцией поликонденсации и содержат в своем составе имидную группу атомов –CO–N–CO. Несмотря на то, что полиимиды полярны, их электрические свойства весьма высоки, а также высока их нагревостойкость. По нагревостойкости из всех органических полимеров только полиимиды и неполярный фторопласт-4 относятся к классу С. При 500 °С ПИ-пленка вдвое прочнее, чем пленка из полиэтилена при 20 °С. Деструкция ПИ протекает лишь при температурах выше 400 °С. Наряду с высокой нагревостойкостью ПИ обладают исключительной холодостойкостью: при криогенных температурах вплоть до –269 °С их механические свойства практически не меняются. Они стойкие к органическим растворителям и разбавленным кислотам, быстрым электронам и излучению, но недостаточно стойки к щелочам.

Из ПИ изготовляют пленки для конденсаторов, кабелей и электрических машин, а также нагревостойкие волокна и сложные детали.

Длительная рабочая температура для ПИ изоляции составляет 200...250 °С а кратковременная – до 500 °С.

Совместные полимеры – полиамидимиды – имеют свойства, промежуточные между свойствами полиамидов и полиимидов.

Электрические свойства полярных полимеров

У полярных полимеров из-за асимметрии строения молекул значительно выражена дипольная поляризация.

У всех полярных полимеров диэлектрическая проницаемость уменьшается с ростом частоты и сложным образом зависит от температуры. Диэлектрические потери определяются процессами дипольно-сегментальной и дипольно-групповой релаксации, следствием чего является наличие максимумов в температурной зависимости tgδ. При повышенных температурах, когда полимер находится в пластичном состоянии, существенную роль начинают играть потери, обусловленные электропроводностью.

Полярные полимеры, по сравнению с неполярными, характеризуются примерно на два порядка большим значением tgδ и заметно меньшим удельным объемным сопротивлением. Поэтому они используются в основном как изоляционные и конструкционные материалы в диапазоне низких частот. Следствием полярности является сильная зависимость удельного поверхностного сопротивления от влажности окружающей среды.

Свойства их можно характеризовать следующими усредненными параметрами:

ε – относительная диэлектрическая проницаемость ..... 3...6

ρ – удельное объемное сопротивление ..... 10^{11}...10^{14} Ом·м;

tgδ – тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10^6 Гц ..... 0,01...0,06;

$E_{пр}$ – электрическая прочность ..... 15...50 МВ/м.

Свойства некоторых полярных полимеров приведены в табл. 6.

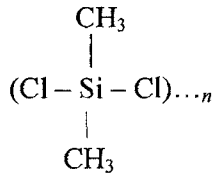
Таблица 6

Основные свойства полярных полимеров

Типы полимеров по их физико-химической природе			Название полимера	Плотность, г/см^3	ρ_v, Ом·м	ρ_s, Ом	ε при 50 Гц	tgδ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м	Нагрево-стойкость, °С	Влагопог-лощаемость за 24 час. %
Органические	Термопластичные	Полимеризационные	Поливинил-хлорид	1,4…1,7	10^{13}	10^{13}	3÷5	0,02	35…45	70…90	0,1…0,2
			Полиметил-метакрилат	1,2	10^{10}…10^{11}	10^{12}	3,6	0,06	15…25	70…90	0,3
			Поливинил-ацетали	1,2…1,3	10^{14}	10^{16}	3,5	0,02	27…35	105	0,6…1,2
		Поликонденсационные	Полиамиды (лавсан)	1,15	10^{12}…10^{13}	10^{13}	3,8…4,2	0,003…0,02	180	180	0,2…1,5
			Полиимиды	1,3…1,4	10^{15}…10^{16}		3,5	0,0006…0,001	160…200	220	1,2
	Термореактивные		Фенолофор-мальдегиды (бакелит)	1,3	10^{10}…10^{11}		4…5	0,06	12	80…120	0,1…0,2
			Полиэфиры (глифталь)	1,2	10^{11}…10^{12}		3…4,5	0,0002…0,02	15…20	110…150	0,1…0,6
			Эпоксидные смолы	1,1…1,25	10^{13}	10^{15}	3…4	0,004	20…80	115…180	0,05 за 10 суток
Элементо-органические			Кремний-органические полимеры	1,6…1,75	10^{12}…10^{13}		3…5	0,01…0,03	15…20	180	0,1

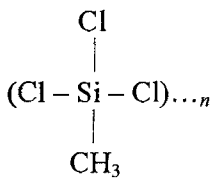
3.3.5. Элементоорганические полимеры

Кремнийорганические полимеры получаются реакцией поликонденсации мономеров, например, диметилдихлорсилана



В результате получается термопластичный полимер, обладающий большой эластичностью, относительное удлинение может достигать 600%.

При поликонденсации метилтрихлорсилана



получаются термореактивные полимеры, которые при нагревании переходят в неплавкое и нерастворимое состояние.

В начальной стадии поликонденсации они растворяются во многих органических растворителях (спирте, бензоле, ацетоне и др.), при дальнейшем увеличении степени поликонденсации растворимость в спиртах уменьшается, а в ароматических углеводородах увеличивается. Растворы смол, нанесенные на поверхность изделия, оставляют на ней после испарения растворителя пленку с высокой термостойкостью и морозостойкостью, устойчивую к действию воды и химически агрессивных сред, а также обладающую высокими электроизоляционными свойствами.

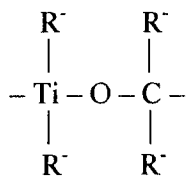
По нагревостойкости с кремнийорганическими материалами могут равняться только полиимиды и фторопласт-4. Пластмассы из кремнийорганических полимеров обладают высокой искро- и дугостойкостью и применяются, например, для деталей электрических контакторов.

Высокая влагостойкость кремнийорганической изоляции позволила создать открытые двигатели, работающие в условиях большой влажности и даже под водой.

Кремнийорганические материалы применяются для изготовления изоляции проводов и кабелей, в виде лаков для пропитки и цементации обмоток электрических машин и аппаратов различного напряжения. Большинство кремнийорганических лаков может длительно работать при температурах 180...200 °С. При добавлении в лаки окислов металлов или металлических порошков (алюминий, цинк, окись титана и др.) получаются жаростойкие эмали, пленки которых выдерживают температуры до 350 и 550°С.

Увеличение допустимой температуры нагрева оборудования до 180...200 °С позволяет увеличить плотность тока в обмотках, что приводит к сокращению веса оборудования на 35...40%. Следовательно, при неизменной мощности габариты электрооборудования сокращаются или при сохранении прежних габаритов соответственно увеличивается мощность. При сохранении рабочих температур, принятых для органической изоляции, срок службы электрических машин и аппаратов с кремнийорганической изоляцией увеличивается в 4...6 раз, возрастает его надежность, устойчивость к кратковременным перегрузкам. Все это важно, особенно для электрооборудования, работающего в тяжелых условиях при наличии влажности, запыленности, тряски, например, для двигателей насосных установок, врубовых машин и угольных комбайнов. Электрооборудование с кремнийорганической изоляцией более пожаробезопасно.

Титаноорганические соединения. В настоящее время известен целый ряд титаноорганических полимерных соединений. Наиболее стабильны полимеры, в которых титан соединен с органическим радикалом R^- кислородным мостиком.

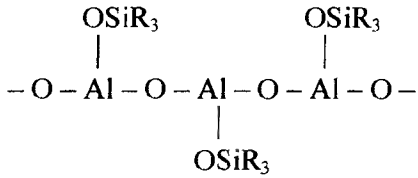


Полимерные титаноорганические соединения имеют высокую нагрево- и химическую стойкость, совершенно непроницаемы для

воды, обладают хорошей адгезией к стеклу и металлам и применяются в качестве защитных покрытий.

Пленки титаноорганических полимеров, содержащие в качестве наполнителя порошковообразный алюминий или слюду, могут выдерживать нагрев до 1000 °С.

Алюминийорганические соединения. В настоящее время алюминийорганические полимеры синтезированы путем сочетания алюмоксановых групп с силоксановыми. Основная цепь таких соединений состоит только из атомов алюминия и кислорода, а группы, содержащие органические радикалы, обрамляют ее:



В начальных стадиях поликонденсации полимер имеет линейную структуру и сохраняет способность растворяться в бензоле, толуоле, хлорбензоле. После удаления растворителя остается твердая термостойкая стекловидная пленка.

При дальнейшем нагревании полимера без добавления воды происходит частичное разрушение кремний-углеродной связи и отдельные цепи полимера соединяются поперечными мостиками, т.е. его молекулы приобретают пространственную структуру.

Некоторые из полученных полимеров выдерживают без разрушения нагрев до 480 °С.

Алюминийорганические полимеры применяются в качестве связующих при изготовлении красок и эмалей, выдерживающих нагревание до 600 °С и обладающих высокой адгезией к металлам.

Одной из основных проблем, которые приходится решать при разработке полимеров, содержащих алюминий, является трудность их обработки.

В настоящее время известны также полимерные органические соединения олова, бора и других элементов, однако практического применения они до сих пор не получили.

3.3.6. Волокнистые материалы

К волокнистым материалам относятся: древесина, бумага, картон, текстильные материалы на основе растительного, природного волокна, а также бумаги и ткани на основе синтетических волокон.

К волокнистым также относятся материалы, выполненные из неорганических волокон, – асбеста, стекла.

Основным отличительным признаком волокнистых материалов является их структура. Стенки сосудов и клеток древесины построены из мельчайших гибких волоконцев-фибрилл. Фибриллы состоят из скоплений молекул, называемых мицеллами. Основным веществом их является целлюлоза (клетчатка) – природное высокополимерное вещество, относящееся к углеводородам и имеющее состав $(C_6H_{10}0_5)_n$, где n выше 1000. Наличие гидроксильных групп ОН делает молекулы целлюлозы полярными, что приводит к высокому значению ε (6,5...7), а также к большой величине tgδ (~0,02). Кроме того, они обусловливают гидрофильность и гигроскопичность целлюлозы, усугубляемую ее волокнистым строением. В непропитанном состоянии древесина обладает низкими и нестабильными электроизоляционными параметрами. Пропитка улучшает ее электрические и механические свойства, снижает гигроскопичность, увеличивает теплопроводность, поэтому в качестве электроизоляционного материала древесина применяется только в пропитанном виде. По нагревостойкости пропитанную древесину относят к классу А.

Пропитывают древесину нефтяными маслами, синтетическими смолами, лаками, компаундами. Однако гигроскопичность древесины и всех ее целлюлозных материалов нельзя полностью устранить пропиткой. Зазоры между молекулами в мицеллах целлюлозы составляют около 1 нм, а зазоры между мицеллами в фибриллах – около 10 нм. Размер молекулы воды очень мал, примерно 0,25 нм. Таким образом, молекулы воды могут проникать глубоко внутрь структуры между макромолекулами, закрепляясь на них за счет притяжения группами ОН. Все пропиточные массы, состоящие из молекул относительно большего размера, чем молекулы воды (не менее нескольких нанометров), заполняют лишь относительно большие поры, а не могут проникнуть в межмолекулярные зазоры, куда проникает вода.

Наибольшее применение в электротехнической промышленности в качестве конструкционно-изоляционного материала находит древесина твердых лиственных пород – бука, березы, граба. Их древесина широко применяется в трансформаторах с жидкостным заполнением для изготовления деталей крепления отводов, опорных элементов обмоток, распорок, а также в электрических машинах для пазовых клиньев и т.п. Древесина используется для производства целлюлозы, бумаги, картона, пластических масс, слоистых пластиков.

При изготовлении электроизоляционных сортов бумаги и картона древесина должна подвергаться специальной химической обработке – варке в растворах (с N_aOH и Na_2S), цель которой удалить содержание примесей (смолистых веществ, минеральных солей и т.п.) и получить после промывки целлюлозные волокна в чистом виде. Такой продукт является сульфатной целлюлозой.

Для изготовления бумаги и картона волокнистый полуфабрикат – сульфатная целлюлоза – подвергается размолу в водной среде, в результате чего получается бумажная масса, или пульпа – водно-волокнистая суспензия. Она поступает на сетку бумагоделательной машины, обезвоживается сначала простым стеканием воды через сетку, а затем – с помощью вакуума и дальнейшего прессования на прессовой части машины. После этого бумага поступает в сушильную часть машины, где нагревается до 45...95 °С и проходит между сбжимающими валами, между которыми постепенно увеличивается давление.

Конденсаторная бумага – наиболее тонкий и высококачественный вид электроизоляционных бумаг. Особенностью конденсаторных бумаг является их малая толщина (4...30 мкм) и повышенное значение ε (6,6). По новой технологии разработано получение борированной нагревостойкой бумаги с малыми диэлектрическими потерями. Производится замена гидроксильных групп ОН иными радикалами (этерификация), что обеспечивает повышенную нагревостойкость таких бумаг до класса Е.

Бумага не является высокочастотным диэлектриком. На переменном токе она используется до частот 10 кГц.

Кроме конденсаторных бумаг имеются и другие электроизоляционные сорта бумаги, выпускаемые для различных целей по своим ТУ.

Электротехническая бумага общего назначения предназначена для межслоевой изоляции катушек трансформаторов.

Бумага электроизоляционная намоточная применяется для производства электроизоляционных бумажно-смоляных изделий (цилиндров, трубок), используемых в трансформаторах и электрических аппаратах всех классов напряжения.

Электроизоляционная пропиточная бумага применяется в основном для обыкновенного и фольгированного гетинакса.

Электроизоляционные картоны отличаются от бумаг на основе целлюлозы повышенной толщиной и относятся к числу старейших электроизоляционных материалов. Все еще применение картона объясняется его низкой стоимостью и высокой механической прочностью при достаточной гибкости. Это дает возможность в сочетании с трансформаторным маслом получить изоляцию с высокими электрическими параметрами. Применяется картон различных марок для изготовления главной изоляции трансформаторов напряжением до 750 кВ и выше. Для деталей ярмовой и уравнительной изоляции трансформаторов всех классов напряжения, а также для крупногабаритных деталей – прямых и обратных воротниковых шайб, угловых шайб, цилиндров и т.д.

Бумаги из синтетических волокон. По мере создания синтетических полимеров с высокими физико-химическими, механическими и электроизоляционными свойствами области применения волокнистой изоляции из целлюлозы для конденсаторов, трансформаторов и электрических машин сужаются.

В изоляции конденсаторов и кабелей, вплоть до напряжений 500 кВ, изоляционные бумаги полностью уступили место синтетическим пленкам и бумагам.

Многие синтетические волокна весьма перспективны для производства электроизоляционных бумаг, поскольку по сравнению с целлюлозными обладают меньшей гигроскопичностью, повышенной нагревостойкостью, улучшенными электрическими свойствами.

Сейчас выпускаются электроизоляционные бумаги и пленки на основе ароматических полиамидов, полиимидов, а также лавсановые, полиэтиленовые, политетрафторэтиленовые и др. Производство электроизоляционных синтетических бумаг осуществляется из нарезанных волокон как мокрым способом (из водной пульпы), так и сухим (осаждение волокон из воздушного потока на движущуюся бесконечную сетку бумагоделательной машины под действием разряжения под сеткой).

Для сцепления синтетических волокон при формировании бумажного полотна применяют связующие вещества, в качестве которых используются поливиниловый спирт, термопластичные волокна винилхлорида и другие, которые имеют более низкую температуру размягчения и плавления по сравнению с основными волокнами. Количество связующего колеблется от 10 до 40%.

В процессе изготовления бумаги под действием температуры и давления как термопластичные основные волокна, так и связующее подтапливаются и растекаются к точкам пересечения основных волокон, что обеспечивает наиболее прочную связь между собой, придавая бумаге необходимые свойства.

В настоящее время выпускаются высококачественные электроизоляционные бумаги на основе полиэтиленовых волокон для изоляции в высоковольтных кабелях и криогенных установках.

На основе полиамидного волокна (фенилона) выпускается электроизоляционная *арамидная бумага* класса нагревостойкости F. Она предназначена для изоляции электрических машин.

Нашими и зарубежными фирмами выпускаются несколько видов *лавсановых электроизоляционных бумаг* классов нагревостойкости F и H для пазовой изоляции высоковольтных электрических машин, а также для производства слоистых пластиков и других композиционных материалов. Электрические свойства синтетических бумаг следующие: $E_{пр} \approx 8$МВ/м и мало изменяется как в процессе теплового старения при 180 °С, так и при воздействии 95% относительной влажности в течение 24 часов; $\rho_v \approx 10^{14}$ Ом·м при 200 °С и за 48 часов увлажнения при относительной влажности 95% снижается на один порядок; $\varepsilon \approx 2{,}2 \ldots 2{,}3$; $\mathrm{tg}\delta \approx (6 \ldots 10) \cdot 10^{-3}$ при 10^3 Гц.

В последние десятилетия волокнистые электроизоляционные материалы на основе целлюлозы в значительной степени вытеснены неорганическими материалами – бумагами и картонами на основе асбеста, стекловолокна и слюдяных волокон. Из них создается также большое количество электроизоляционных бумаг и композиционных материалов – пластмасс, превосходящих аналогичные материалы на основе целлюлозы по влаго- и нагревостойкости.

3.3.7. Композиционные материалы (пластмассы). Слоистые пластики. Электроизоляционные лаки, клеи и компаунды

Пластическими массами (пластмассами, пластиками) называют группу неметаллических материалов, которые способны изменять свою форму при определенных давлениях и температурах. После прекращения действия этих факторов пластмассы устойчиво сохраняют приданную им форму.

Пластмассы – композиционные материалы, т.е. в их состав входит несколько компонентов: связующее, наполнитель, пластификатор или отвердитель, краситель.

Связующее составляет основу пластмассы. Связующее – это высокомолекулярные полимеры, синтетические (реже – натуральные) смолы и их смеси.

Наполнитель. В качестве наполнителя применяются порошкообразные, волокнистые или крошкообразные органические или неорганические вещества – древесная, кварцевая или слюдяная мука, графит, бумага, ткани, стекловолокно, стеклоткань, асбест и др. Количество наполнителя в пластмассах составляет обычно 40...60%.

Наполнитель вводится с целью снижения стоимости пластмасс, а также улучшения их механической прочности, нагревостойкости. Однако введение наполнителя, как правило, снижает их электрические характеристики. Поэтому в качестве пластмасс с высокими электроизоляционными свойствами часто применяются только чистые полимеры без каких-либо наполнителей.

Иногда в составе пластмасс присутствуют *пластификаторы*, увеличивающие эластичность и уменьшающие хрупкость. Это камфара, олеиновая, кислота, парафины и др.

Отвердители (сшивающие агенты) вводят с целью создания поперечных связей между молекулами полимеров для образования неплавких пластмасс. *Отвердители* – это кислоты, ангидриды и т.п.

Иногда в состав пластмасс вводят *красители* – сурик, охра и др.

По виду связующего пластмассы разделяются на термопласты и реактопласты. Пластмассы с термореактивным связующим и различными наполнителями часто называют пресс-материалами.

В настоящее время ряд отраслей промышленности, такие как электротехническая, радиотехническая, химическая, машиностроение и др., уже не могут обходиться без пластмасс. Это объясняется тем, что пластмассы обладают рядом ценных свойств. Их плотность (0,9...2,2 т/м^3) значительно ниже плотности большинства других материалов, особенно металлов. Они технологичны. Многие из них обладают высокой химической стойкостью, механической прочностью и высокими электроизоляционными свойствами. Используя различные полимеры и добавки, можно получить пластмассы с таким комплексом свойств, который нельзя получить в других материалах.

Применение композиционных пластмасс в качестве электроизоляционных и чисто конструкционных материалов очень широко: из них выполняют корпуса радиоприемников, телевизоров, измерительных приборов, наушники, ламповые панельки, клеммные щитки, головки кнопок, рукоятки, штепсельные разъемы и др. Изготовление таких изделий обычной механической обработкой было бы весьма трудоемко, прессование же из пластмассы позволяет получить их за одну технологическую операцию.

Среди термопластичных пластмасс (термопластов) применение в качестве электроизоляционных материалов получили как чистые полимеры (полиэтилен, поливинилхлорид, фторопласты), так и композиционные пластмассы (полиамиды с наполнителями, полиимиды).

Наибольшим разнообразием по свойствам и применению характеризуются термореактивные пластмассы (реактопласты). Из них чаще используются фенопласты, аминопласты, кремнепласты, пластмассы на основе эпоксидных смол с различными наполнителями.

По структуре наполнителя реактопласты делятся на порошкообразные (пресс-порошки) и волокнистые (волокниты).

Область применения пластмасс в электротехнике в значительной степени определяется их нагревостойкостью.

Реактопласты отличаются повышенной влаго- и нагревостойкостью.

Основные свойства и рекомендуемые области применения реактопластов следующие.

Фенопласты электроизоляционные. Основа – фенольные смолы. В качестве наполнителей может быть древесная мука, кварцевая или слюдяная.

Изготавливаются из пресс-порошков прямым прессованием с подогревом при температурах от 130 до 185 °С в течение 4...15 мин на 1 мм толщины изделия. Рабочая температура изделий до 100...150 °С. Температура, при которой начинается деформация, – от 150 до 200 °С; $\rho_v \approx 10^7...10^{12}$Ом·м. Предназначены они для слабонагруженных радио- и электротехнических деталей (каркасы катушек, разъемы, панели, колодки выводов) на напряжение свыше 1 кВ, работающих в нормальных климатических условиях.

Фенопласты, модифицированные полиамидными смолами с кварцевой мукой в качестве наполнителя, имеют высокие диэлектрические свойства, а также повышенную влаго- и нагревостойкость. Они выдерживают температуру 220 °С в течение 5000 часов. Из них выполняют высококачественные детали, работающие при напряжении свыше 1 кВ (платы печатных схем, детали реле).

Аминопласты, получаемые при замене фенола (C_6H_5-OH) амином (C_6H_5- OH), менее полярны, чем фенопласты, поэтому менее гигроскопичны.

Аминопласты ценны тем, что позволяют придавать пластмассам любую яркую окраску, тогда как феноло-формальдегидные пластмассы из-за темно-коричневого цвета самой смолы окрашиваются только в коричневый или черный цвет. Из алюминопластов выполняют клеммные щитки, головки кнопок и различные радиоэлектронные детали. Аминопласты обладают более высокими электрическими свойствами, чем фенопласты.

Волокниты, получаемые путем прессования формальдегидных смол с асбестом, а также рубленным стекловолокном с добавлением извести, талька, кроме повышенной нагревостойкости (класс F) и хороших электроизоляционных свойств ($\rho_v = 10^{12}$Ом·м; $\rho_s = 10^{14}$Ом; $tg\delta = 0{,}03...0{,}02$) отличаются высокими прочностными свойствами и стойкостью к истиранию. Из них выполняются детали конструкционного и электротехнического назначения (каркасы катушек, колодки, изоляторы, кронштейны щеткодержателей, пазовые клинья и т.д.).

Волокниты, содержащие кремнийорганические смолы (кремнепласты) и резанное алюмоборосиликатное стекловолокно, а также асбест, молотый кварц, имеют повышенные диэлектрические свойства, высокую дугостойкость и сохраняют стабильность свойств до температур 350 °С. Поэтому они применяются для дугогасительных

камер, проходных изоляторов, корпусов автоматических выключателей и т.п. $\rho_v = 10^{13}...10^{15}$ Ом·м; $\rho_s = 10^{13}...10^{15}$ Ом; $tg\delta = 0{,}004...0{,}008$; нагревостойкость класса Н.

Полиимидные материалы, получаемые прессованием и содержащие измельченное алюмоборосиликатное стекловолокно длиной 0,015...0,15 мм, стойки к истиранию, окислению и действию кислот. Их применяют для высокочастотных деталей в радиоэлектронике и приборостроении, поскольку их диэлектрические характеристики удовлетворяют необходимым требованиям: $\rho_v = 10^{14}...10^{13}$ Ом·м; $\rho_s = 10^{14}...10^{16}$ Ом; $tg\delta = 0{,}004...0{,}002$; класс нагревостойкости Н.

Слоистые пластики являются разновидностью композиционных пластмасс, в которых в качестве наполнителя используют листовые волокнистые материалы. К слоистым пластикам относятся гетинакс и текстолит.

Гетинакс получают горячей прессовкой бумаги, пропитанной феноло-формальдегидной смолой (бакелит в стадии А) или другими смолами этого же типа. Для производства используется прочная и нагревостойкая пропиточная бумага. Листы бакелизированной бумаги после их сушки собирают в пакеты, и эти пакеты прессуют на гидравлических прессах при температуре 160 °С под давлением 10...12 МПа. Время выдержки от 2 до 5 мин на каждый миллиметр толщины пакета. Во время прессования смола сначала размягчается, заполняя поры между листами и волокнами, а затем затвердевает, переходя в неплавкую стадию С. В результате волокнистая основа связывается в прочный монолитный материал.

Слоистое строение гетинакса приводит к анизотропии свойств. Так, удельное объемное сопротивление гетинакса вдоль слоев в 50...100 раз ниже, чем поперек; электрическая прочность вдоль слоев в 5...8 раз ниже, чем поперек.

Гетинакс относится к числу сильнополярных диэлектриков, так как волокнистая основа и пропитывающее вещество обладают полярными свойствами. Его электрическая прочность (перпендикулярно слоям) составляет около 30 МВ/м, $\varepsilon = 6...7$, $tg\delta = 0{,}04...0{,}08$ (на частоте 10^6 Гц).

Для изготовления печатных схем низкочастотных цепей радиоаппаратуры используют фольгированный гетинакс. В настоящее время выпускается около десяти марок такого материала. Он представляет собой гетинакс, облицованный с одной или с двух сторон

электрической красно-медной фольгой толщиной 0,035...0,05 мм. Требуемый рисунок печатной схемы получают путем избирательного травления.

Сравнительно новым материалом является гетинакс марки ЛГ на основе лавсановой бумаги и эпоксидной смолы. Отличительные особенности лавсанового гетинакса: высокие влагостойкость, механические и электрические свойства. Благодаря высокому уровню электрических свойств в условиях повышенной влажности детали из него не требуют лакировки. Гетинакс ЛГ успешно заменяет электротехнические текстолиты.

Текстолит – пластик, аналогичный гетинаксу, но его изготавливают из пропитанной хлопчатобумажной ткани. Текстолит имеет повышенную стойкость к истиранию и сопротивление раскалыванию. Он применяется для изделий, подвергающихся ударным нагрузкам или работающих на истирание (детали переключателей, подшипники). Текстолит в 5-6 раз дороже гетинакса. Водопоглощаемость у текстолита несколько меньше, но электрические характеристики ниже, чем у гетинакса. Благодаря большей прочности на раскалывание текстолит значительно лучше подвергается механической обработке, чем часто и оправдывается его применение вместо более дешевого гетинакса. Для текстолита рабочие температуры находятся в пределах от –65 до +105 °С (табл. 7). Различные марки гетинаксов и текстолитов отличаются по свойствам и применению.

Особым видом текстолитов являются стеклотекстолиты, которые изготавливаются на основе не хлопчатобумажной, а стеклянной ткани. Благодаря этому они обладают сравнительно высокими нагревостойкостью, влагостойкостью, механической прочностью и хорошими электроизоляционными свойствами. Особенно высоки перечисленные свойства стеклотекстолитов со связующими на основе эпоксидных и кремнийорганических смол. Стеклотекстолиты с нагревостойкостью класса *F* изготовляют с применением фторопластов. Они находят применение в изоляции роторов турбогенераторов (клинья, распорки).

Электроизоляционные лаки, клеи. В процессе изготовления изоляции лаки и клеи используют в жидком виде, но в готовой изоляции они находятся уже в твердом состоянии. Таким образом, это твердеющие материалы.

Таблица 7

Основные свойства слоистых пластиков и компаундов

Показатель	Единица измерения	Название материала					
		Гетинакс	Текстолит	Стекло-текстолит	Компаунды		
					битумные	кремний органические	эпоксидные
Плотность	т/м^3	1,3…1,4	1,3…1,45	1,6…1,8		1,2…2,0	1,4…1,8
Рабочая температуры	°С	–60… +105	–60… +105	–60… +105	–60… +80	–60… +250	–60… +130
ρ_v	Ом·м	10^9…10^{11}	10^8…10^{10}	10^{10}…10^{12}	10^{12}	10^{13}	10^{12}
tgδ		0,06…0,1	0,06…0,2	0,004… 0,03	0,007	0,015 при 10^6 Гц	0,015
$E_{пр}$	МВ/м	20…40 при 20 °С	5…12 при 90 °С	35…50 при 20 °С 12…17 при 180 °С	20 при 20°С	30 при 20 °С	20…34 при 20 °С 18 при 155 °С
ε		6…8	5…6,5	4,5…7	2,8	3,0 при 10^6 Гц	3…7
Теплопроводность	Вт/м·К	0,35	0,25		0,07		0,1…0,3

Лаки (клеи) состоят из лаковой основы (пленкообразующего) и летучего растворителя. К числу пленкообразующих (основы лака) относятся природные и синтетические смолы (полимеры), битумы (сложные смеси нефтяных углеводородов), высыхающие масла (льняное, тунговое), эфиры целлюлозы и различные их композиции.

К числу важнейших растворителей относятся ароматические углеводороды (бензин, керосин, уайт-спирит, толуол, ксилол, сольвент), хлорированные углеводороды (дихлорэтан, хлорбензол), одноатомные и многоатомные спирты (этиловый, изопропиловый, бутиловый), а также скипидары. В качестве растворителя используется также реакционная вода.

При удалении из лака растворителя, т.е. при «высыхании» лаков, происходят сложные химические процессы окисления, полимеризации, поликонденсации и другие, в результате которых и образуется твердая лаковая пленка. Для ускорения процесса в состав лаков добавляют сиккативы, а также отвердители, например, соли и оксиды металлов.

В зависимости от типа полимера (смолы), составляющего основу лака, длительная рабочая температура лаковых пленок колеблется от 90 до 180 °С.

Электроизоляционные лаки классифицируются по химическому составу, режиму сушки и по назначению.

По химическому составу лаки классифицируются в зависимости от вида основы, например, масляно-канифольные, масляно-битумные, бакелитовые, глифталевые, кремнийорганические и т.д.

По режиму сушки электроизоляционные лаки подразделяются на лаки горячей (печной) и холодной (воздушной) сушки. Первая группа требует для получения оптимальных свойств лаковой пленки температур сушки выше 70 °С. Для лаков холодной сушки достаточно температуры около 30 °С. Для изоляции электрических машин и аппаратов, работающих при температурах 105...180 °С и выше, предпочтительно применение лаков горячей сушки. Лаки холодной сушки применяются в основном при ремонтных работах.

По назначению лаки можно разделить на три основные группы: пропиточные, покрывные, клеящие (или клеи).

Пропиточные лаки служат для пропитки пористой и, в частности, волокнистой изоляции. В результате пропитки повышается пробивное напряжение, увеличивается теплопроводность (это важно для отвода теплоты потерь), уменьшается гигроскопичность, улучшаются механические свойства изоляции.

Покрывные лаки служат для образования механически прочной, гладкой, блестящей, влагостойкой пленки на поверхности твердой изоляции. Такая пленка повышает напряжение поверхностного разряда и поверхностное сопротивление изоляции, создает защиту изделия от действия влаги, растворителей и химически активных веществ, а также улучшает внешний вид изделия и затрудняет прилипание к нему загрязнений.

Некоторые покрывные лаки (*эмаль-лаки*) наносят не на изоляцию, а непосредственно на металл, образуя на его поверхности электроизоляционный слой (например, изоляция эмалированных проводов). В производстве проводов с эмалевой изоляцией наибольшее значение имеют синтетические лаки, на основе которых выпускается более 90% всех эмалированных проводов. Эмаль-лаки применяются также и для изоляции листов электротехнической стали в расслоенных магнитопроводах электрических машин и аппаратов.

К покрывным лакам относятся также пигментированные эмали – лаки, в состав которых входит пигмент, т.е. порошок неорганического состава (обычно оксиды металлов), придающий пленке определенную окраску, улучшающий ее механическую прочность, теплопроводность и адгезию к поверхности, на которую нанесен лак. В полупроводящих лаках пигментом является углерод (сажа); пленки таких лаков имеют низкое удельное поверхностное сопротивление (от 10^2 до 10^{10} Ом) и используются в производстве электрических машин на высокие рабочие напряжения для улучшения картины электрического поля на границе пазовых и лобовых частей обмоток.

Клеящие лаки применяются для склеивания между собой твердых электроизоляционных материалов. Помимо высоких электроизоляционных свойств и малой гигроскопичности (общие требования для всех электроизоляционных лаков), клеящие лаки должны обеспечивать особо высокую адгезию к склеиваемым материалам.

Приведенное разделение лаков по областям применения не всегда может быть выдержано достаточно строго. Так, при изготовлении гетинакса и текстолита лак, пропитывающий отдельные слои бумаги или ткани и склеивающий эти слои друг с другом, является одновременно пропиточным и клеящим.

Электроизоляционные компаунды – это смеси различных изоляционных веществ, которые в процессе изготовления из них изоляции переходят из жидкого состояния в твердое. От лаков они отли-

чаются отсутствием в их составе растворителя. Компаунды подразделяют на термопластичные и термореактивные; по назначению – на пропиточные и заливочные. Наиболее широкое распространение в электроизоляционной технике получили эпоксидные компаунды – композиции на основе эпоксидных смол, с различными отвердителями и катализаторами. Эти компаунды термореактивны. Для них кроме высоких электрических свойств характерны высокая нагревостойкость, механическая прочность, высокая адгезия и весьма высокие влагозащитные свойства. Вследствие отсутствия растворителей компаунды лучше лаков обеспечивают герметизацию узлов и деталей электрических и радиотехнических устройств. Все большее распространение получают кремнийорганические компаунды. Компаунды широко применяются для опрессовки и герметизации полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Они применяются для пропитки и заливки трансформаторов, дросселей, конденсаторов. Однако заливка термореактивным компаундом исключает возможность ремонта в случае повреждения прибора или устройства. Основные свойства слоистых пластиков и компаундов приведены в табл. 7.

3.3.8. Эластомеры

К этой группе относятся материалы на основе каучука – *резины*.

Отличительным свойствам каучука является его высокая эластичность. Эластичность – свойство материала сильно удлиняться при растяжении (до 500% от первоначальной длины) без относительного удлинения за счет упругости после снятия нагрузки.

Натуральный каучук получают из сока (латекса) тропических растений – каучуконосов, после удаления из латекса белковых веществ, жирных кислот, солей и др. Натуральный каучук – это полимер углеводорода изопрена $(C_5H_8)_n$. Он представляет из себя эластичную массу, которая при температурах –20, 30 °С становится хрупкой, а при нагреве до +40, +50 °С размягчается и становится клейкой. Высокая растяжимость каучука связана с зигзагообразной (шарнирной) формой цепочек его молекул, при действии на которые растягивающего усилия форма цепочек приближается к прямолинейной. Каучук не гигроскопичен, совершенно нерастворим в воде, но хорошо растворим в органических растворителях

(бензине и т.д.), образуя резиновый клей. В силу низких механических свойств чистый каучук для изготовления электрической изоляции не применяется.

Для устранения указанных выше недостатков каучук подвергают вулканизации, т.е. нагреву после введения в него серы. При вулканизации происходит частичный разрыв двойных связей цепочечных молекул и пространственное сшивание цепочек через атомы – S –; таким образом, добавка серы делает каучук термореактивным.

Вулканизация улучшает как нагревостойкость, так и морозостойкость каучука, повышает его механическую прочность и стойкость к растворителям. В зависимости от количества серы, добавляемой к каучуку, получают различные продукты: при 1...3% серы – мягкую резину, обладающую еще весьма высокой растяжимостью и упругостью, а при 30...35% серы – твердую резину (эбонит) – твердый материал, обладающий высокой стойкостью к ударным нагрузкам.

Помимо каучука и серы в состав резиновой смеси вводят различные наполнители (мел, тальк и др.), существенно влияющие на свойства резины, а также красители, катализаторы процесса вулканизации и другие вещества.

Резина применяется для изготовления диэлектрических перчаток, галош, ковриков. К недостаткам резины как электроизоляционного материала относятся низкая нагревостойкость (Y) малая стойкость к действию нефтяных масел и света, особенно ультрафиолетового, под влиянием которого резина быстро стареет, трескается.

Тиурамовая резина, при изготовлении которой берут не чистую серу, а тиурам, - органическое сернистое соединение ($C_6H_{12}N_2S_4$), обладает более высокой нагревостойкостью. Так, в кабельных изделиях для обычных (сернистых) резин допускается рабочая температура +55 °С, а для тиурамовых резин +65 °С.

В 30-х годах XX века освоено производство синтетических каучуков бутадиенового (C_4H_6); изопренового (C_5H_8) и др.

Кабельные резины применяют главным образом для переносных кабелей и приводов, так как таким изделиям требуется придавать максимальную гибкость. К ним относятся также силовые и контрольные напряжением 600 В и 1 кВ, шахтные кабели, экскаваторные, электросварочные, лифтовые и ряд других, которые эксплуатируются в исключительно тяжелых условиях. Для высокой механической прочности и эластичности такие резины содержат

40...45% каучука. В ряде случаев в конструкцию кабелей вводят круглый или профилированный резиновый сердечник, размещаемый по оси кабеля. Обычно это делается для герметизации или для устойчивости конструкции многожильного кабеля при недостаточном количестве жил, обеспечивающих их равномерную скрутку. В целях равномерного заполнения повивов добавляют холостые жилы в виде резиновых жгутов диаметром, равным диаметру изолированных жил.

Электропроводящие резины накладывают на поверхность резиновой изоляции или между токопроводящей жилой и изоляцией. Это осуществляется со следующей целью. В силу тяжелых эксплуатационных условий кабели по разным причинам получают механические повреждения, что может привести к коротким замыканиям и послужить причиной поражения людей электрическим током. Наличие в кабеле поверх изоляции каждой изолированной жилы экранирующего слоя из электропроводящей резины создает возможность мгновенно передать импульс к быстродействующей коммутационной аппаратуре для опережающего отключения электрооборудования и предупредить аварию.

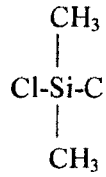
За последние годы получили значительное применение провода и кабели в резиновых оболочках с концевыми заделками контактов. Заделку концевых кабелей с запрессовкой металлической арматуры производят с помощью изоляционных *защитных резин*. К ним предъявляются особые требования – способность адгезии к металлу, специальные технологические свойства, обеспечивающие плотную запрессовку места заделки. Содержание каучука в таких резинах 30...40%.

Электроизоляционные резины в нормальных условиях имеют следующие значения электрических характеристик: $\varepsilon \approx 3{,}5...3{,}8$; $\rho_v = 10^{12}...10^{13}$ Ом·м; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}01...0{,}03$ при $f = 50$ Гц; $E_{пр} = 14...40$ МВ/м.

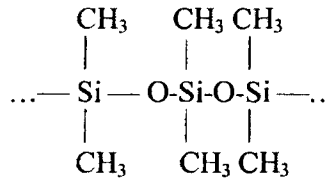
К числу твердых резин относится *эскапон*, получаемый путем полимеризации синтетического бутадиенового каучука при температурах 260...300 °С и давлении 2...3 МПа без доступа воздуха. Он применяется как высокочастотный материал благодаря очень низкому значению $\mathrm{tg}\delta$: при 10^6 Гц $\mathrm{tg}\delta = 0{,}0006...0{,}001$.

Более высокие нагревостойкость, озоно- и светостойкость имеют *кремнийорганические эластомеры – каучук и резина.*

Для получения эластомеров кремнийорганический мономер (диметилдихлорсилан)



обрабатывается водой, взятой в избытке. Полученные продукты путем нагрева или под действием катализаторов (например, серной кислоты) превращают в высокомолекулярные полимеры, имеющие строение



Чтобы из кремнийорганического эластомера получить теплостойкие каучук или резину, его подвергают обработке, которую можно сравнить с вулканизацией органических каучуков. В результате такой обработки между линейными цепями эластомеров образуются поперечные связи, в результате чего повышаются эластичность, механическая прочность и теплостойкость.

Для вулканизации кремнийорганических эластомеров в них вводят некоторое количество инициатора (например, перекиси), который вызывает частичное окисление органических радикалов и образование поперечных связей. Одновременно в эластомер добавляют различные наполнители (окись цинка, окись кремния, белую сажу и др.), которые повышают механические характеристики и придают необходимые свойства резинам.

Полученную массу раскатывают в листы, прессуют в формах или наносят на провода. Затем сырое, отформованное из эластомера изделие помещают в термостат, где оно нагревается при нормальном давлении в течение примерно 15...18 часов от 100 до 200 °С (при повышении давления длительность процесса значительно сокращается). В результате получается нерастворимый эластичный материал – кремнийорганическая резина.

Резины на основе кремнийорганических каучуков обладают высокой нагревостойкостью. Длительная рабочая температура их

достигает 250 °С, разложение наступает при 400 °С. Эластичность и механические свойства этих каучуков и резин сохраняется в широком интервале температур от высоких (+180, +250 °С) до низких (–90 °С). Все органические резины в указанных интервалах температур становятся пластичными или хрупкими и жесткими.

Недостатком кремнийорганических резин является их низкая механическая прочность при разрыве, которая составляет 45…50 кг/см^2, в то время как для органических резин она находится в пределах 100…180 кг/см^2.

Некоторые кремнийорганические каучуки и резины применяются для изоляции токопроводящих жил в кабелях, не распространяющих горение. Такие кабели сохраняют работоспособность и не прерывают подачу энергии при нормальном напряжении после пребывания в течение 8 часов в пламени при температуре 950 °С. Это объясняется тем, что при разрушении такой резины под действием огня образуется двуокись кремния, обладающая хорошими диэлектрическими свойствами и способствующая самопогасанию пламени.

Проводники, изолированные лентами из кремнийорганического каучука, после опрессовки при повышенной температуре имеют монолитную, водостойкую и озоностойкую изоляцию.

Электродвигатели с такой изоляцией с успехом могут работать во влажной среде и даже под водой.

Кремнийорганическая резина применяется также в качестве изоляции для высоковольтных электрических машин и в многих других отраслях техники. Из нее изготовляются специальные шланги, уплотнители и прокладки для различных печей, холодильных установок, оборудования химической промышленности.

Основные характеристики кремнийорганических резин: $\varepsilon \approx 4…6$; $\rho_v = 10^{12}$ Ом·м; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}01…0{,}001$; $E_{пр} = 20$ МВ/м; плотность – 1,25…1,9 т/м^3; относительное удлинение – 100…350%; класс нагревостойкости F, H.

3.3.9. Основные способы изготовления изделий из полимеров и пластмасс

При переработке пластмасс в изделия чаще всего применяются следующие способы:

1) прессование;
2) литье под давлением;
3) экструзия;
4) литье без давления.

Прессование применяется для переработки термореактивных пресс-материалов. При прямом прессовании определенное количество (доза) пресс-материала в виде порошка, волокнистой массы или предварительно заготовленной таблетки загружается в нагретую до 130...180 °С металлическую пресс-форму и прессуется под давлением 150...500 кг/см^2 (в зависимости от материала, формы и размеров изделия). При этом термореактивная смола вначале расплавляется, затем происходит формование изделия, после чего вследствие продолжающего нагрева происходит дальнейшая полимеризация и смола переходит в твердое, нерастворимое и нерасплавляемое состояние. Поэтому отформованное изделие после окончания процесса прессования и извлечения из формы сохраняет приданную ему форму.

Схема прямого прессования деталей показана на рис. 37. Пресс-материал загружается в матрицу *1* пресс-формы, давление пресса передается через верхнюю подвижную часть пресс-формы – пуансон *2*. Готовое изделие *3* после изготовления извлекается при помощи выталкивателя *4*.

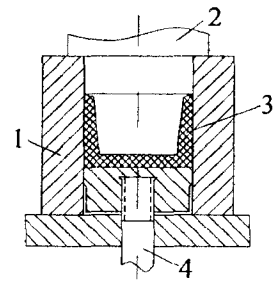


Рис. 37. Схема прессования деталей из пластмассы

Методом прямого прессования за одну операцию можно изготовить изделие сложной формы значительных габаритов и точных размеров.

Литье под давлением (пресс-литье) применяется обычно для изготовления из термопластичных материалов изделий, имеющих сложное сечение, арматуру и требующих большой точности.

Засыпанный в бункер *1* пресс-материал (рис. 38) попадает в загрузочную камеру *4*, где нагревается с помощью нагревателя *3* и переходит в жидкое состояние, после чего под давлением поршня *2* через литник выдавливается в закрытую охлаждаемую водой пресс-форму *5* и заполняет ее полости. Процесс полностью автоматизирован.

Современные автоматы для пресс-литья могут выпускать за смену до 30000 мелких изделий. Получение изделий из термореактивных материалов методом литья под давлением затрудняется тем, что при нагревании эти материалы быстро теряют текучесть и отвердевают.

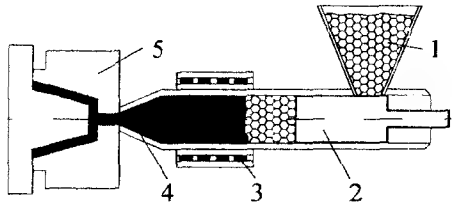


Рис. 38. Схема изготовления изделий из пластмасс методом литья под давлением

Производство крупногабаритных изделий из кристаллизующихся полимеров методом литья под давлением сопровождается большими усадками, приводящими к нарушению монолитности отливок вследствие образования раковин и утяжек. Это затруднение вызвало необходимость создания метода центробежного литья, пригодного для материалов с высокой текучестью в размягченном состоянии.

Способ центробежного литья основан на использовании центробежных сил для уплотнения во время сплавления материала в монолитную заготовку. Этот способ применяется, например, для изготовления изделий из полиамидов. Материал в виде крошки или порошка загружают в плотно закрывающуюся форму, которую затем нагревают до температуры литья 200...250 °С.

Для полного расплавления материала форму выдерживают в термошкафу, после чего устанавливают в самоцентрирующийся трехкулачковый патрон токарного станка и приводят во вращение со скоростью от 800 до 1500 об/мин. Вращение формы прекращают после полного затвердения материала.

Метод центробежной отливки отличается простотой применяемой оснастки, высоким качеством получаемых заготовок и возможностью получения их различных габаритных размеров. Отливки особенно пригодны для изготовления шестерен, так как они имеют повышенную плотность на поверхности. Это объясняется перемещением под действием центробежных сил к стенкам формы более высокомолекулярных фракций полимера.

Экструзионное формование осуществляется на специальных червячных прессах (экструдерах), в которых вращающий шнек нагнетает, перемешивает и непрерывно выдавливает размягченный материал через оформляющую головку (фильеру). Выдавливаемое изделие охлаждают и разрезают на участки нужной длины. Схема экструзионного процесса представлена на рис. 39.

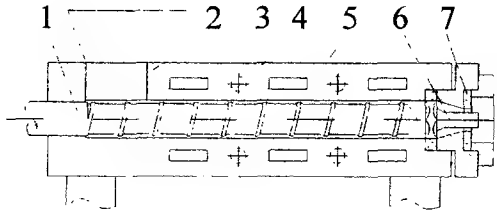


Рис. 39. Схема экструдера:
1 – шнек; *2* – загрузочное отверстие; *3* – водяной или паровой обогрев; *4* – воздушное охлаждение; *5* – цилиндр; *6* – дорн, оформляющий внутреннюю поверхность профиля; *7* – формообразующий мундштук

Материал в виде порошка, гранул или ленты подается через загрузочное отверстие *2* в обогреваемый цилиндр *5* червячного пресса. Вращающийся со скоростью 20...100 об/мин шнек *1*, находящийся в цилиндре, захватывает материал, перемешивает его и уплотняет. Одновременно материал нагревается от стенок цилиндра до стадии текучести. Он уплотняется и перемещается вдоль цилиндра за счет уменьшающегося шага или уменьшающейся глубины нарезки шнека. Масса выходит через оформляющую головку *7* и попадает в приемное устройство, где охлаждается воздухом или водой.

Цилиндр экструдера обогревается горячей водой или паром до температуры, превышающей температуру шнека. Поэтому размягченный материал не налипает на шнек, а перемещается вдоль него. Наиболее эффективная пластикация и смешение массы достигаются максимальным трением ее о стенки цилиндра; в то же время условия перемещения требуют, чтобы трение материала о поверхность шнека было минимальным. Для этого шнек делают полым и несколько охлаждают водой.

Производительность экструдера определяется диаметром шнека, отношением его длины к диаметру, скоростью вращения и типом профиля. В современных экструдерах диаметр шнека колеблется от 9 до 400 мм, отношение его длины к диаметру – от 6 до 36.

В зависимости от типа перерабатываемого материала применяются шнеки с постоянным и переменным шагом, с постоянной или изменяющейся глубиной нарезки.

Конфигурация профилированных изделий определяется конструкцией головки экструдера.

Методами экструзии термопластичных материалов получают и пленки. Выходящая из экструдера труба раздувается сжатым воздухом до необходимых размеров, при этом происходит поперечная и продольная вытяжка с ориентацией материала. Степень продольной вытяжки зависит от скорости вращения зажимных валков, которые одновременно превращают цилиндрическую трубу в плоскую.

Раздувкой трубчатой заготовки сжатым воздухом можно изготавливать из термопластов и полые изделия (флаконы, бутыли). Для этого трубка, выходящая из головки экструдера, поступает на приспособление для выдувания.

Литье без давления не требует сложного оборудования, оно нуждается лишь в формах и термостатах для отверждения жидких термореактивных смол. Применяется для изготовления заготовок изделий в виде блоков, прутков и т.д., которые после отверждения подвергаются механической обработке. Методом литья без давления изготавливают также монолитную изоляцию электрических машин и трансформаторов из эпоксидных и кремнийорганических смол. Для этого изделия пропитывают или полностью заливают смолой в соответствующих формах, а затем нагревают для дальнейшей полимеризации и отверждения смолы. Иногда уплотняют при давлении 0,5...5 кг/см^2. Этим способом получают изделия из органического стекла, гетинакса, текстолита и др.

3.4. Твердые неорганические электроизоляционные материалы

К неорганическим относятся материалы, молекулы которых не содержат соединений атомов углерода с водородом.

В отличие от органических и элементоорганических полимеров молекулы неорганических материалов связаны обычно между собой силами электростатического взаимодействия, а не ван-дер-ваальсовыми силами. У неорганических материалов в отличие от органических и элементоорганических отсутствует высокоэластичное состояние. Характерной для них является негорючесть. Нерастворимость и

ограниченная сегментальная подвижность (хрупкость) объясняется усиленным межцепным взаимодействием благодаря высокой полярности неорганических групп атомов.

3.4.1. Электроизоляционные стекла

Стеклами называются аморфные тела, получаемые путем переохлаждения расплава независимо от их химического состава и температурной области затвердевания, приобретающие в результате постепенного увеличения вязкости механические свойства твердых тел, причем процесс перехода из жидкого состояния в твердое является обратимым.

Структура и химический состав стекол. Неорганические стекла, получаемые в промышленных условиях, характеризуются неупорядоченностью и неоднородностью внутреннего строения, т.е. состоят из микрообластей с различной пространственной структурой и химически неоднородным строением.

Одна гипотеза – кристаллитная – рассматривает структуру стекол как скопление микрокристаллических образований, названных кристаллитами, размером примерно 10...300 Å.

Предполагается, что структура центральной части кристаллита наиболее близка к структуре кристаллической решетки, а по мере удаления от центра упорядоченная структура атомов все больше нарушается и переходит в беспорядочную аморфную структуру.

По другой гипотезе структурный стеклообразующий каркас неорганических стекол представляется в виде непрерывной беспорядочной пространственной трехмерной сетки, в узлах которой расположены ионы, атомы или группировки атомов.

Предполагается, что непрерывная сетка стекол в каждом отдельном случае состоит из структурных одинаковых элементов – тетраэдрических группировок, например из тетраэдров SiO_4, GeO_4, PO_4 и других, а в промежутках между ними расположены ионы металлов, например, Na, Ca и др.

По химическому составу стекла подразделяются на оксидные и халькогенидные (полупроводниковые). Халькогенидные стекла получаются на основе бескислородных соединений мышьяка As_2S_3, сурьмы Sb_2Se_3, селена P_2Se_3 и др.

Свойства диэлектриков имеют лишь оксидные стекла. Основу их составляют стеклообразующие окислы, к которым относятся SiO_2, B_2O_3, P_2O_5. Наибольшее распространение получили силикатные стекла (основа – SiO_2) благодаря доступности сырьевых компонентов, дешевизне и высокой химической устойчивости.

Основным исходным сырьем для изготовления силикатных стекол являются следующие материалы: песок SiO_2, каолин или глинозем Al_2O_3, сода Na_2CO_3, поташ K_2CO_3, известняк $CaCO_3$, доломит $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ и некоторые другие. Эти материалы высушиваются, размалываются до 0,6...0,7 мм и просеиваются. После этого их отвешивают в нужных соотношениях и тщательно перемешивают для получения шихты, которая и поступает в стекловаренную печь. В стекловаренной печи под действием высокой температуры 1100...1700 °С шихта плавится, летучие части H_2O, CO_2, SO_3 удаляются, а оставшиеся химические окислы реагируют между собой, в результате чего образуется однородная стекломасса, которая и идет на выработку изделий. Процесс варки продолжается несколько часов. Стеклообразное состояние материалов получается лишь при быстром охлаждении стекломассы. В случае медленного охлаждения начинается частичная кристаллизация, стекло теряет прозрачность из-за нарушения однородности, а получаемые изделия обладают при этом низкой механической прочностью. В процессе охлаждения расплава сильно изменяется вязкость стекломассы (от 10^8 до 10^{12} Па·с).

На температурной зависимости вязкости есть две характерные точки. Одна соответствует температуре текучести $T_т$, выше которой проявляются свойства текучести, типичные для жидкого состояния. Другая точка соответствует температуре стеклования $T_с$, ниже который проявляется хрупкость стекла.

Интервал между $T_т$ и $T_с$ называют интервалом размягчается, в котором стекло обладает пластичными свойствами. Этот интервал для большинства стекол составляет ~300 °С. Чем шире интервал размягчения, тем технологичнее стекло, поскольку в этом интервале возможно успеть получить изделие требуемой формы.

Получение изделий из стекла осуществляется методами выдувания, центробежного литья, прессования, отливки и т.п.

Кварцевое стекло получают из чистой двуокиси кремния SiO_2 при температурах выше 1700 °С. Оно имеет самую высокую температуру варки.

Кварцевое стекло обладает рядом замечательных свойств. Оно имеет наименьшее значение температурного коэффициента линейного расширения из всех известных веществ вообще: $5{,}5 \cdot 10^{-7}$ K^{-1}. Предел прочности на сжатие (до 2100 МПа) в 4-5 раз превышает предел прочности на сжатие других стекол. Предел прочности при растяжении кварцевого стекла хотя и выше, чем у других стекол, но существенно ниже по сравнению с пределом прочности на сжатие. Он составляет около 60 МПа.

Малый температурный коэффициент линейного расширения обусловливает высокую стойкость кварцевого стекла к тепловым импульсам. Нагретое докрасна кварцевое стекло можно моментально погружать в холодную воду, не вызывая его разрушения. Благодаря высокой нагревостойкости и химической инертности к действию большинства реактивов кварцевое стекло получило широкое применение в технологии производства чистых веществ в качестве конструкционного материала (реакторы, ампулы, лодочки, тигли и т.п.).

Кварцевое стекло отличается высокой прозрачностью для излучения в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной области спектра вплоть до длины волны порядка 4 мкм. Поэтому оно является ценным оптическим материалом: из него изготавливают линзы, призмы, оптические окна, баллоны ламп ультрафиолетового излучения и др.

По электрическим свойствам кварцевое стекло относится к хорошим высокочастотным диэлектрикам с преимущественно электронной поляризацией $\varepsilon = 3{,}8$; $\rho > 10^{16}$ Ом·м; $\mathrm{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-4}$ – на частоте 10^6 Гц; $E_{пр} = 500$ МВ/м.

Однако кварцевое стекло имеет очень узкий интервал размягчения и даже при 1700 °С характеризуется высокой вязкостью. В связи с этим из него удается получать изделия только простейшей конфигурации.

Для улучшения технологических характеристик (понижения температуры варки, расширения интервала размягчения) состав стекла усложняют, вводя другие окислы: B_2O_3, Al_2O_3, а также окислы двухвалентных и одновалентных металлов. Присутствие одно- и двухвалетных ионов приводит к разрыхлению пространственной сетки стекла, образуя тупиковые ветки (разрыв связей). Все это вызывает понижение температуры размягчения стекла. С другой стороны, слабо связанные щелочные ионы под действием теплового движения могут срываться с мест закрепления и перемещаться из

одной ячейки пространственной сетки в другую. При этом усиливается ионно-релаксационная поляризация, что сопровождается увеличением диэлектрической проницаемости (ε = 5–16) и тангенса угла диэлектрических потерь. Одновременно наблюдается уменьшение удельного сопротивления материала, так как возрастает количество ионов, участвующих в процессе электропроводности.

Изменение электрических свойств стекла при введении в него щелочной добавки зависит от радиуса щелочного иона. Чем меньше радиус ионов, тем больше их подвижность, тем больший вклад вносят они в удельную проводимость материала.

Атомы многовалентных металлов встраиваются в структурную сетку стекла, не образуя тупиковых ветвей. Более того, становясь на месте существующих обрывов связей, такие ионы могут соединить и укрепить пространственную сетку. Поэтому их присутствие в составе стекол уменьшает электропроводность и не приводит к увеличению релаксационных потерь.

Объемное удельное сопротивление стекол при невысоких температурах (до 200 °С) находится в пределах от 10^8 до 10^{17} Ом·м, поэтому многие стекла, особенно бесщелочные или малощелочные, являются хорошими диэлектриками. При 200...400 °С электропроводность стекол повышается примерно в 10^8...10^{10} раз.

Диэлектрические потери в стеклах складываются из потерь проводимости, релаксационных и структурных (миграционных) потерь. Диэлектрические потери при повышенных температурах связаны главным образом с потерями проводимости, поэтому влияние химического состава на величину диэлектрических потерь аналогично его влиянию на электропроводность стекол, т.е. компоненты, увеличивающие электропроводность (щелочные окислы), увеличивают также и диэлектрические потери в стеклах. Для стекол tgδ находится в пределах 0,0002...0,02.

Пробой стекол вызывается электрическими и тепловыми процессами, возникающими под действием электрического поля. Неоднородность внутренней структуры, а также дефекты (микротрещины, каверны и пр.) стекол значительно снижают их пробивное напряжение. В однородном электрическом поле, особенно при постоянном напряжении, электрическая прочность стекол очень велика и может достигать 500 МВ/м.

В переменном электрическом поле сказывается влияние теплового пробоя, вызванного диэлектрическими потерями, поэтому пробивная напряженность резко понижается (17...80 МВ/м). На тепловой характер пробоя стекол указывает снижение электрической прочности при увеличении температуры и толщины образца.

Силикатные стекла по составу, а в связи с этим и по электрическим свойствам (тангенсу угла диэлектрических потерь и удельной проводимости) можно подразделить на три группы.

1. *Бесщелочные стекла* (отсутствуют окислы натрия и калия). В эту группу входит чисто кварцевое стекло (плавленый кварц), а также стекла, содержащие SiO_2, Al_2O_3. B_2O_3 и окислы двухвалентых металлов: BaO, MgO и др. Стекла данной группы обладают высокой нагревостойкостью, высокими электрическими свойствами, но имеют узкий интервал размягчения, поэтому из них трудно изготавливать изделия, особенно сложной конфигурации и с малыми допусками по размерам.

2. *Малощелочные стекла с высоким содержанием окислов* PbO, BaO, CaO. Эти стекла, обладая удовлетворительной обрабатываемостью, имеют повышенные электрические свойства, приближающиеся при нормальной температуре к электрическим свойствам стекол первой группы.

3. *Щелочные стекла.* В эту группу входит большинство обычных стекол. Они отличаются пониженной нагревостойкостью, легко обрабатываются при нагреве («технологичны»), но имеют пониженные электрические свойства.

При содержании в стеклах в больших количествах щелочных окислов снижается химическая стойкость, увеличивается гигроскопичность. Стекла состава (2...3) $SiO_2 \cdot Na_2O$ полностью растворяются в воде, образуя жидкое стекло (силикатный клей). Теплопроводность стекол по сравнению с теплопроводностью других твердых тел исключительно низкая. Коэффициент теплопроводности различных стекол колеблется в пределах $(0{,}7...1{,}55)\cdot 10^{-3}$ Вт/м·К.

В качестве электроизоляционных материалов применяются бесщелочные и малощелочные стекла.

По техническому назначению электротехнического стекла делятся на электровакуумные (ламповые); установочные (изоляторные); стекловолокно; световоды; лазерные стекла. Кварцевое стекло относится к электровакуумным стеклам.

В связи с низким температурным коэффициентом линейного расширения α_L отличным от такового для всех металлов, кварцевое стекло не может надежно спаиваться с металлами выводов электровакуумных баллонов обычными технологическими приемами (сваркой, спайкой). В этом случае применяют так называемые переходные стекла, имеющие промежуточное значение α_L и позволяющие создать плавный переход по α_L от кварцевого стекла к металлам, обеспечивающий допустимые значения напряжений в спае. Такие стекла применяют при изготовлении высокоинтенсивных источников света, фотоэлементов, оптических квантовых генераторов и т.п. Состав переходных стекол характеризуется многокомпонентностью и содержит окислы SiO_2, B_2O_3, Al_2O_3; PbO, BaO, ZnO, MqO, CaO, Na_2O, K_2O, Li_2O.

Электровакуумные стекла делятся на группы по признаку спаиваемости с определенным металлом или сплавом. Так, стекла молибденовой группы имеют α_L близкий к α_L молибдена и при спаивании с ним образуют прочные вакуумно-плотные спаи; стекла вольфрамовой группы – с вольфрамом и т.д.

Изоляторные стекла применяются для изготовления телефонных изоляторов, бус, плат, а также и для высоковольтных изоляторов линий электропередач.

Изоляторные стекла по составу являются бесщелочными или малощелочными. В последние десятилетия фарфоровые изоляторы для высоковольтных линий электропередач уступили место стеклянным, которые имеют ряд преимуществ перед фарфоровыми:

1. Для производства стеклянных изоляторов используется более распространенное и дешевое сырье.

2. Технологический процесс изготовления стеклянных изоляторов полностью автоматизирован, в результате чего их производство дешевле, чем фарфоровых.

3. Контроль качества стеклянных изоляторов при их производстве, а также в эксплуатации проще, чем фарфоровых вследствие прозрачности стекла.

4. Механические и термические свойства стеклянных изоляторов из закаленного стекла выше, чем фарфоровых. Поэтому изоляторы из закаленного стекла по своему весу и размерам оказываются меньшими, чем фарфоровые при одинаковых механических и электрических характеристиках.

Для производства высоковольтных стеклянных изоляторов разработаны стекла, содержащие SiO_2, Al_2O_3, CaO, MgO, MnO. Составы некоторых стекол для высоковольтных изоляторов были разработаны и в Белорусском национальном техническом университете. Для изготовления изоляторов можно применять только закаленное стекло. Такие изоляторы выдерживают перепад температур в 250 °С. Одновременно возрастает и их термическая прочность, которая для заколенных изоляторов даже из малощелочного стекла превышает 100 °С вместо 30...35 °С для незакаленных.

После варки стекломасса для изготовления изоляторов подается в пресс-форму. Продолжительность прессования подвесного изолятора составляет 90...100 с. Следующей операцией является закалка. Поскольку температура отдельных участков изолятора после его удаления из пресс-формы оказывается различной, то изолятор помещают в специальную печь для выравнивания температуры, где он в течение нескольких минут равномерно прогревается до 700...780 °С. Закалка изделий производится в закалочной установке, которая представляет собой устройство для подачи охлаждающего воздуха через сопла. Конфигурация установок и расположение сопел приближаются к форме изолятора для равномерного охлаждения всех участков его поверхности.

Процесс закалки каждого изолятор продолжается в среднем 7–10 минут.

После закалки изолятор подвергается испытанию на тепловой удар (определяется его термостойкость). Для этого он нагревается в термостате до температуры 120...150 °С, после чего погружается в ванну с проточной водой с температурой 20...25 °С и выдерживается в ней.

В случае недоброкачественной закалки или каких-либо других дефектов в изоляторе он разрушается в процессе этого испытания. Таким образом, все дефектные изоляторы отбраковываются и проводить в дальнейшем какие-либо контрольные электрические или механические испытания нет необходимости.

После проверки термостойкости стеклянной части изолятора производится армировка изоляторов, и они поступают на склад готовой продукции.

На складе закаленные изоляторы должны выдерживаться около трех месяцев, так как возможно самопроизвольное растрескивание изделия в результате дефектов, не выявленных при отбраковке термическим ударом.

Производительность автоматической линии для производства закаленных подвесных изоляторов составляет 2 млн штук изоляторов в год. Весь технологический процесс изготовления и испытания осуществляется автоматически. Обслуживают линию 4 человека, которые лишь наблюдают за исправностью механизмов.

Изоляторные стекла используют для изготовления проходных изоляторов в виде стеклянной бусы, изолирующей металлические выводы полупроводниковых приборов от фланца корпуса, на котором расположен полупроводниковый кристалл с *p–n*-переходами. Стеклянные бусы изготавливают из капилляров, нарезанных в виде трубочек и колец. Обычно для таких целей используют щелочное силикатное стекло.

На поверхностную проводимость стекла оказывает влияние адсорбирующаяся на поверхности влага в виде водяной пленки. Она вызывает гидролитическое разложение поверхностного слоя стекла, поэтому для получения стеклянных диэлектриков высокого качества применяют стекла с повышенной химической стойкостью или на поверхность стекла наносят защитные гидрофобные покрытия (кремнийорганические лаки и пр.).

Стекловолокно. При малой толщине стекло обладает достаточной гибкостью. Стеклянные волокна очень малой толщины (3…9 мкм) имеют настолько большую гибкость, что могут обрабатываться всеми известными приемами текстильного производства.

Получение стеклянного волокна основано на вытягивании с большой скоростью нитей из расплавленного стекла. Сосудом, в котором происходит плавление стекла, служит «лодочка», изготовленная из тугоплавкого платинового сплава. На дне лодочки имеются отверстия (фильеры) диаметром около 1 мм; через эти отверстия под действием собственного веса и вытекает расплавленная стеклянная масса. Выходящие из отверстий нити наматываются на вращающийся барабан с очень большой скоростью (2 км/мин и более), вследствие чего нити, не успевая еще охладиться и затвердеть, вытягиваются в очень тонкие волокна (3…9 мкм).

Несколько волокон (до 100 и более) соединяются в пряди при помощи «замасливателя», благодаря чему при дальнейшей перемотке с барабана не происходит спутывания волокон из различных прядей.

Из стеклянных нитей, скрученных из отдельных прядей, затем ткут стеклянные ткани, ленты и другие изделия. Толщина тканей и лент из стеклянного волокна лежит в пределах 0,07...0,28 мм.

Для изготовления электроизоляционных стеклопластиков применяется волокно из алюмоборосиликатного бесщелочного стекла. Липкая изоляционная стеклолента изготовляется из высоконагревостойкого кварцевого стекла с добавкой Al_2O_3. Стеклоткань пропитывается кремнийорганическим лаком. При применении липкой стеклоленты получается монолитная изоляция, диэлектрические свойства которой после нагрева до 180 °С значительно возрастают. Применяется она для выполнения витковой изоляции и изолирования лобовых частей электрических машин.

Для изготовления полупроводящей стеклолакоткани в состав кремний органических лаков вводится графит, который и обусловливает ее полупроводящие свойства. Толщина полупроводящей стеклолакоткани составляет 0,12...0,2 мм, удельное поверхностное сопротивление равно $10^3...10^5$Ом; при повышенной температуре электрические свойства не меняются. Применяется для покрытия изоляции статорных обмоток высоковольтных электрических машин с целью выравнивания градиента напряжения (особенно в местах выхода обмоток из паза).

Стеклоэмали. Эмалями (стеклоэмалями) называются стекловидные покрытия по металлам или стеклу (аналогичные покрытия по керамике называют глазурью). Для эмалей применяют многокомпонентные алюмоборосиликатные щелочные стекла различного состава. Они используются для защиты металлов (или стекол) от коррозии, для электрической изоляции, а также для получения красивого внешнего вида. При эмалировании порошок стекла измельчают, наносят на поверхность металла и обжигают. В результате плавления эмаль растекается по поверхности изделия и после охлаждения остается на ней в виде тонкого (0,1...0,2 мм) сплошного стекловидного покрытия.

Нанесение эмали на поверхность изделия может проводиться сухим или мокрым способом. При более распространенном мокром способе из эмали приготавливают шликер (суспензию порошка стекла в воде), который наносится на поверхность путем пульверизации или путем погружения в него изделия (метод окунания). При сухом способе нагретое в печи изделие посыпается порошком эмали (метод пудры).

Основная область применения эмалей в качестве электроизоляционных материалов – покрытие трубчатых резисторов, в которых на наружную поверхность керамической трубки нанесена проволочная обмотка. Наносимый поверх нее слой эмали создает изоляцию между отдельными витками обмотки и между обмоткой и окружающей средой и одновременно защищает ее от влаги, окисления и т.п.

Для предотвращения растрескивания температурные коэффициенты линейного расширения эмали и материала, на который наносится эмаль, должны быть приблизительно равными.

3.4.2. Ситаллы

Общие сведения. Ситаллы представляют собой класс поликристаллических материалов, получаемых путем направленной кристаллизации стекла.

В технологическом отношении производство ситаллов отличается от производства стекла лишь одной дополнительной стадией кристаллизацией изделий, которая может следовать сразу за формованием, минуя отжиг (или после него).

Введение в стекло некоторых каталитических добавок обусловливает выделение в нем огромного числа центров кристаллизации и создает тем самым условия для образования тонкокристаллической структуры.

Содержание кристаллической фазы в ситаллах в зависимости от условий их получения – от 30 до 95% и более. Размер кристаллов очень мал по сравнению с кристаллами в керамике – от 0,05 до 1 мкм, т.е. ситаллы характеризуются весьма мелкокристаллической структурой.

Если свойства стекла в основном определяются его химическим составом, то для ситаллов решающее значение имеют структура и фазовый состав выделяющихся в процессе кристаллизации кристаллических зерен т.е. свойства ситаллов не являются аддитивными, их нельзя рассчитать по формулам. Подбирая экспериментально состав ситаллов и режим термообработки (кристаллизации), получают ситаллы с заданными физико-химическими и электрическими свойствами. Преимущества ситаллов перед стеклами состоят в более высоких физико-химических и электрических показателях; особенно важны высокие значения механической прочности, теплопроводности, температуры размягчения. Преимущества ситаллов

перед керамикой в большой электрической прочности из-за отсутствия газовых пор. Доступность сырья и простая технология обеспечивают невысокую стоимость.

Электроизоляционные показатели ситаллов, как правило, превосходят показатели стекол того же химического состава: ситаллы имеют более высокие удельное сопротивление, электрическую прочность и более низкий tgδ. Необходимо отметить, что теплопроводность ситаллов выше, чем у стекол, но ниже, чем у качественной керамиккки.

Фотоситаллы – ситаллы, получаемые в результате кристаллизации специальных светочувствительных стекол. В качестве каталитических добавок в фотоситаллах используются соли золота, серебра или меди в количестве сотых–тысячных долей процента. Под воздействием облучения и последующей низкотемпературной термообработки (так называемого проявления) происходит выделение металлов в виде мельчайших коллоидальных частиц (стекло приобретает окраску). При более высокой температуре термообработки начинается кристаллизация облученных участков стекла, причем частицы металлов (Ag, Au, Cu) служат центрами кристаллизации основных кристаллических фаз.

Ультрафиолетовое облучение заготовок из светочувствительного стекла может осуществляться либо по всей поверхности, либо по определенному рисунку (с применением специальных шаблонов). После кристаллизации засвеченной заготовки ее подвергают травлению в кислотах, при котором происходит растворение менее стойкой к кислоте закристаллизованной части изделия. Таким образом, получают плоскую стеклянную заготовку точных размеров и сложной формы (фасонные пластины, держатели электродов, сетки с микроотверстиями и т.д.).

После этого заготовку вновь подвергают двустороннему облучению (по всей поверхности) и кристаллизации в области более высоких температур (800...850 °С). Получаемое в результате такого многоступенчатого процесса изделие из фотоситалла непрозрачно и помимо фотографически точных размеров обладает высокой прочностью, твердостью, хорошими электроизоляционными показателями. Некоторые показатели свойств электротехнических ситаллов:

Удельная теплопроводность	0,8...2,5 Вт/м·К;
Температурный коэффициент линейного расширения	$(5...140)\cdot10^{-7}$ $К^{-1}$.

Температура текучести	750...1350 °С.
Предел прочности при сжатии	0,5...1,2 ГПа.
Электрическая прочность	70...160 МВ/м.
tgδ	$(10...800)\cdot10^{-4}$ при 10^6 Гц
ε	5...8 при 10^6 Гц
Интервал рабочих температур	от –50 до +800 °С.

Применяются ситаллы для подложек гибридных интегральных схем, микромодульных плат, подложек для печатных плат, тонкопленочных резисторов и т.п.

Стекла для оптических волокон. Световоды. В цифровых сетях связи оптические кабели как средство передачи информации имеют ряд преимуществ перед электрическими:

1) широкая полоса пропускания, позволяющая передать сигналы со скоростью 1...2 тыс. бит в секунду;

2) низкий уровень потерь сигнала (при распространении на 120...350 км практически нет потерь);

3) нечувствительность к электромагнитным помехам. Это позволяет прокладывать волоконно-оптические кабели (ВОК) в местах с высоким уровнем помех, например, использовать для этих целей ЛЭП, опоры для контактной силовой цепи.

Другие преимущества: малые размеры и масса ВОК; его пожаробезопасность; экологическая чистота, химическая устойчивость, а также возможность передачи изображения по искривленному пути.

В отличие от медного провода переносчиком сигнала в оптическом волокне является не электрический ток, а световой луч, распространение которого в прозрачной среде (оптоволокне) как луча (или волны) должно подчиняться законам оптики.

Оптическое волокно в простейшем случае состоит из сердцевины (с) и оболочки (об). Они имеют разные, хотя и близкие по величине показатели преломления $n_с > n_{об}$. Сердцевина используется как среда передачи, а оболочка служит для создания границы раздела между ней и сердцевиной. Эта граница формирует физический канал (волноводного типа) – световод, по которому и распространяется световой луч – переносчик передаваемого информационного сигнала. Световой луч падая из среды, оптически более плотной ($n_с$-больший), на поверхность раздела со средой, оптически менее

плотной ($n_{об}$-меньший), под углом, большим предельного, будет испытывать полное внутреннее отражение и, многократно отражаясь, пойдет вдоль волокна.

Оптическое волокно может быть пластмассовым (из полимеров) и стеклянным, однако в настоящее время используется, как правило, волокно из кварцевого стекла, имеющее меньшее затухание. Изготовление волокна проходит в два этапа:

1) изготовление цилиндрической заготовки с заданным профилем угла преломления, например, методом химического осаждения из газовой фазы;

2) вытягивание заготовки в волокно с сохранением соотношения диаметров сердцевины и оболочки.

Химический состав стекол для оптических волокон (ОВ).

1. Кварцевые стекла (оптические) содержат в основном SiO_2 и несколько процентов присадки B_2O_3, P_2O_5, GeO_2, Al_2O_3.

2. Многокомпонентные стекла для ОВ – сплавы SiO_2 с несколькими процентами (до 10% каждый) Na_2O, CaO. Температура плавления таких стекол 1000 °С.

Для передачи изображения используют волокна диаметром 5...15 мкм. Световой кабель (жгут) диаметром 5-6 мм содержит несколько тысяч светоизолированных волокон. Для правильной передачи изображения требуется регулярная укладка волокон в жгуте, т.е. относительное расположение волокон на его входном и выходном торцах должно быть одинаковым. В световодах, имеющих жилу диаметром 0,1 мм, могут распространяться более 10000 световых волн.

3.4.3. Керамические материалы

Керамическими материалами (керамикой) называют неорганические материалы, получаемые из минералов и оксидов металлов путем высокотемпературного спекания (обжига).

При спекании в керамической массе происходят твердофазовые химические реакции, в результате чего структурный состав полученного изделия отличен от структурного состава исходных материалов.

Основные преимущества керамики: 1) высокая нагревостойкость, износостойкость и механическая прочность; 2) высокая радиационная стойкость; 3) устойчивость против старения; 4) возможность получения заранее заданных характеристик путем изменения состава массы.

К недостаткам керамики можно отнести: 1) невозможность изготовления гибких изделий; 2) трудность механической обработки (изделия поддаются только шлифовке).

Техническая керамика разделяется на керамику высшей огнеупорности и радиотехническую (электротехническую) керамику.

В электро- и радиотехнике применяются следующие виды керамики: вакуумная, высокочастотная, конденсаторная, полупроводниковая, ферромагнитная и другие, с необходимым для каждой из этих областей техники набором физико-механических и электрических параметров.

Одним из старейших видов керамики, используемой как электроизоляционный материал, является фарфор.

Для его изготовления применяют высококачественную глину–каолин $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ (~ 50% состава фарфора); кварцевый песок SiO_2 (~ 25% состава фарфора), полевой шпат – минерал – $K_2O\,(H_2O) \cdot Al_2O_3$ (~ 25% состава фарфора).

Технологический процесс изготовления фарфора состоит из следующих обязательных операций: 1) очистка от примесей всех составных частей фарфора; 2) тонкое измельчение и тщательное смешивание исходных компонентов в однородную массу с водой; 3) фильтрование массы пропусканием через магнитный сепаратор, а затем через фильтр-пресс под давлением (0,8–3 МПа) для отделения воды; 4) обработка обезвоженной массы в вакууме для удаления воздушных включений; 5) пластификация массы (добавление в нее 6...14% раствора парафина с керосином или 2...5% водного раствора поливинилового спирта); 6) формование изделий из пластифицированной массы различными методами: прессованием, выдавливанием через мундштук, литьем под давлением; 7) глазурование и спекание (обжиг) изделий.

Спекание (обжиг) изделий проводится в течение 20...70 часов в электрических печах при температурах 1300 °С и выше. При этом процессе происходят твердофазовые химические реакции между компонентами.

Основными фазами, из которых состоят получаемые фарфоровые изделия, являются кристаллическая (одна или несколько), стекловидная, а также некоторое количество газовой фазы.

Основные свойства фарфора – диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, коэффициент линейного расширения,

механическая прочность – во многом зависят от особенностей кристаллической фазы.

Стекловидная фаза представляет собой прослойки стекла, связывающие кристаллическую фазу. Технологические свойства керамики – температура спекания, степень пластичности керамической массы при формовании – определяются в основном количеством стекловидной фазы. От ее содержания зависят также плотность, степень пористости и гигроскопичность материала. Некоторые виды радиокерамики вообще не содержат стекловидной фазы.

Наличие газовой фазы обусловлено способом обработки массы и приводит к снижению механической и электрической прочности керамических изделий, а также вызывает диэлектрические потери при повышенных напряженностях поля вследствие ионизации газовых включений. В процессе обжига вследствие испарения внутримолекулярной влаги, выгорания пластификатора и уплотнения материала происходит усадка изделий, т.е. уменьшение их размеров, которое может доходить до 20%.

Все керамические материалы более или менее пористые. Даже в обожженной до максимальной плотности керамике объем закрытых пор составляет 2...6%, а в пористых материалах, таких как фарфор, объем пор 15...25%, причем у фарфора открытая пористость.

Для устранения поверхностной пористости перед обжигом фарфоровые изделия покрывают тонким слоем (0,1...0,3 мм) глазури в виде водной порошковой эмульсии. Глазури по химическому составу являются многокомпонентными стеклами – стеклоэмалями, температура плавления которых ниже температуры обжига фарфора. При охлаждении после обжига на поверхности изделия образуется равномерный блестящий стекловидный слой. В радиотехнической и электротехнической промышленности для глазурования используются стеклоэмали с температурой размягчения 560...710 °С.

Глазурь уменьшает гигроскопичность фарфора (практически до нуля), увеличивает поверхностное сопротивление и напряжение поверхностного пробоя, глазурное покрытие увеличивает механическую прочность, уменьшая количество микротрещин на поверхности и других дефектов. Необходимо, чтобы температурный коэффициент расширения глазури был почти равен или несколько ниже, чем у фарфора (чтобы глазурь работала на сжатие).

Ранее основное производство фарфора шло на изготовление изоляторов, в том числе подвесных высоковольтных изоляторов линий

электропередач. В настоящее время эти изоляторы с успехом заменяются на стеклянные – более дешевые, легкие и технологичные. Сейчас фарфор применяется для изготовления ламповых панелей, внутриламповых изоляторов, корпусов резисторов, разъемов, штепсельных соединений.

Электрические свойства фарфора при нормальной температуре достаточно высоки: его электрическая прочность – 10...30 МВ/м, удельное объемное сопротивление – $10^{12}...10^{13}$ Ом·м; диэлектрическая проницаемость – 6...7; тангенс угла потерь – 0,015...0,02. При повышении температуры электроизоляционные свойства фарфора очень сильно ухудшаются, что вполне понятно, так как стекловидная масса фарфора, полученная из содержащих значительное количество натрия и калия минералов типа полевого шпата, является щелочным стеклом, и ее электрические свойства быстро снижаются при подъеме температуры.

Улучшенные электрические свойства по сравнению с фарфором имеют другие виды керамики.

Корундовая керамика с содержанием глинозема (Al_2O_3) 95...99% получила название алюминоксида. Этот материал имеет очень плотную структуру, отличается низкими диэлектрическими потерями в диапазоне радиочастот и при повышенных температурах, обладает весьма высокой нагревостойкостью (до 2000 °С), большой механической прочностью и хорошей теплопроводностью.

Удельная теплопроводность алюминоксида в 10...20 раз выше, чем у фарфора.

Керамика из алюминоксида используется в качестве вакуумплотных изоляторов в корпусах полупроводниковых приборов и подложек интегральных микросхем. Она изготавливается из мелкозернистого порошка Al_2O_3 высокой чистоты, который прессуется при комнатной температуре, а затем запекается при весьма высокой температуре (1750 °С). Благодаря высокой плотности такой керамики можно обеспечить высокую чистоту обработки поверхности. Керамика из Al_2O_3 является ценным материалом для осаждения пассивных элементов гибридных интегральных микросхем.

Существенным преимуществом керамических подложек по сравнению со стеклянными и ситалловыми является их высокая теплопроводность. Скорость отвода теплоты от тонкопленочных элементов во многом определяет допустимые значения рассеиваемой в

них электрической мощности. Среди неметаллических материалов наиболее высокой теплопроводностью 200...250 Вт/(м·К) обладает керамика на основе окиси бериллия (95...99% BeO). Ее теплопроводность в 200...250 раз превышает теплопроводность стекол и стеклокристаллических материалов. К тому же она имеет высокие электрические параметры: $\rho = 10^{16}$ Ом·м, $tg\delta \le 3 \cdot 10^{-4}$(на частоте 1 МГц) и широко применяется для подложек микросхем. Недостатком ее является токсичность порошкообразного BeO, что требует соблюдения строгих мер техники безопасности на всех этапах технологического цикла изготовления из нее изделий.

Стеатит – вид керамики, изготовляемый на основе минерала талька $3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$. Стеатитовая керамика обычно изготовляется обжигом массы, составляемой из талькового порошка с некоторыми добавками. Возможно также изготовлять детали из талькового камня путем его непосредственной механической обработки (которая проста ввиду мягкости материала) с последующим обжигом. Сорта стеатита, предназначенные для высокочастотной изоляции, имеют весьма малый тангенс угла потерь ($\sim 2 \cdot 10^{-4}$) и хорошие механические свойства (прочность на разрыв – 400...500, на изгиб – 1200...1600 и на сжатие – 6000...8000 кг/см^2). Преимуществом стеатитовой керамики является также малая усадка при обжиге, позволяющая получать изделия со сравнительно точными размерами. К тому же он не нуждается в глазуровке (благодаря плотной структуре) и может дополнительно обрабатываться шлифовкой. Стеатит широко используется в радиотехнической аппаратуре для опорных плат, деталей корпусов полупроводниковых приборов, высокочастотных проходных изоляторов, а также в силовой электротехнике.

К группе *конденсаторной керамики* относятся материалы с высокой величиной диэлектрической проницаемости, позволяющие использовать их в качестве диэлектрика сравнительно компактных конденсаторов. Большая часть этих материалов имеет в качестве основной составной части рутил (двуокись титана) TiO_2 – титанатная керамика.

Различные конденсаторы на основе рутила (тиконды) имеют $\varepsilon \approx 60...150$. Характерной особенностью их является большая величина температурного коэффициента диэлектрической проницаемости, который может быть как положительным, так и отрицательным.

В области низких частот и повышенных температур преобладающее влияние имеет ионно-релаксационная поляризация с несколькими видами релаксаторов; значение ε оказывается высоким, а знак температурного коэффициента диэлектрической проницаемости – положительным. При высоких частотах главную роль играют электронная и ионная поляризации; при этом знак температурного коэффициента диэлектрической проницаемости отрицательный. Подбирая составы керамики, в которых кристаллическими фазами являются твердые растворы станната кальция $CaSnO_3$, титаната кальция $CaTiO_3$ и цирконата кальция $CaZrO_3$, можно получить очень незначительный температурный коэффициент диэлектрической проницаемости как с положительным, так и с отрицательным знаком. Керамика на основе указанных твердых растворов используется для изготовления высокочастотных термостабильных конденсаторов.

Основу низкочастотной конденсаторной керамики составляют титанат бария $BaTiO_3$ и твердые растворы с сегнетоэлектрическими свойствами, на основе $PbTiO_3$, $KNbO_3$, $LiTaO_3$ и др. Благодаря присущей сегнетоэлектрикам доменной структуре и спонтанной поляризации конденсаторная сегнетокерамика обладает весьма высокой диэлектрической проницаемостью ($\varepsilon = 900...8000$), которая, однако, не отличается температурной стабильностью и зависит также от частоты и напряженности электрического поля.

Из сегнетокерамики изготовляются малогабаритные низкочастотные конденсаторы с большой удельной емкостью (вариконды). В пленочном исполнении сегнетоэлектрическая керамика является основой разнообразных радиотехнических устройств – параметрических усилителей, модуляторов, управляемых фильтров и др.

Все сегнетоэлектрики обладают пьезоэлектрическими и пироэлектрическими свойствами.

Основным материалом для изготовления пьезокерамических элементов являются твердые растворы $PbZrO_3$-$PbTiO_3$ (цирконат-титанат свинца, или сокращенно ЦТС). Эта керамика широко используется для создания мощных ультразвуковых излучателей в широком диапазоне частот для целей гидроакустики, дефектоскопии, механической обработки материалов. Такие ультразвуковые генераторы применяются в полупроводниковой технологии для эффективной отмывки и обезжиривания полупроводниковых пластин

с помощью ультразвуковой ванны. Из пьезокерамики делают малогабаритные микрофоны, телефоны, громкоговорители (высокочастотные), слуховые аппараты. Пьезокерамические элементы можно использовать в качестве датчиков давлений, деформаций, ускорений и вибраций.

Все сегнетоэлектрики проявляют пироэлектрические свойства, но только в монодоменизированном состоянии, для которого характерна одинаковая ориентация спонтанной поляризованности всех доменов. В полидоменном образце суммарная поляризованность равна нулю, и поэтому пироэффект отсутствует. Монодоменизация сегнетоэлектрика осуществляется путем выдержки его в постоянном электрическом поле при температуре несколько ниже точки Кюри. Создание и закрепление монодоменизированного состояния в сегнетоэлектрических кристаллах является одной из важнейших проблем при использовании их в качестве пироэлектриков.

Значительный пироэффект в сегнетоэлектриках используется для создания тепловых датчиков и приемников лучистой энергии, предназначенных, в частности, для регистрации инфракрасного и СВЧ-излучения. Принцип действия пироэлектрических фотоприемников очень прост: лучистая энергия, попадая на зачерненную (поглощающую) поверхность сегнетоэлектрического кристалла, нагревает его. В результате нагревания изменяется спонтанная поляризованность кристалла и возникает импульс тока, который регистрируется электронной схемой.

3.4.4. Слюда и материалы на ее основе

В современной электротехнической промышленности слюда применяется благодаря большой нагревостойкости, высоким электроизоляционным свойствам и высокой химической стойкости. Слюда практически не стареет.

Слюда – природный минерал, встречающийся в виде жил в горных породах (так называемая комовая слюда).

В природных жилах слюда представлена сравнительно мелкими кристаллами водных алюмосиликатов двух разновидностей: флогопита $K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ и мусковита $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \times \times 6SiO_2 \cdot 2H_2O$. Размеры кристаллов в поперечнике – от долей мм

до нескольких мм. Месторождения крупных кристаллов площадью от 4 до 200 $см^2$ встречаются весьма редко и ценятся очень дорого, поэтому в чистом виде слюда находит весьма ограниченное применение.

После извлечения слюды из жилы она очищается от посторонних примесей и в таком виде называется забойным сырцом. Средний выход слюды из породы в виде забойного сырца составляет всего 1...2%. Забойный сырец подвергают ручной разборке – удаляют дефекты и расщепляют на тонкие пластинки. Полученная *щепаная* слюда в виде пластин длиной от 7 до 60 мм и шириной от 4 до 50 мм находит применение только в исключительных случаях для очень ответственных приборов и устройств – сложные детали для электронных приборов, мишени передающих телевизионных трубок, основы мозаичного фотокатода, измерительные конденсаторы, основная изоляция в агрегатах зажигания реактивных двигателей и т.п.

Электрические свойства такой слюды очень высоки: $tg\delta = 6 \cdot 10^{-4}$ при частоте 10^6 Гц; $E_{пр} \geq 65$ МВ/м; $\varepsilon \geq 6{,}0$. Для электротехнических целей широко применяют композиционные материалы на основе пластинок щепаной слюды. Эти материалы получили название миканитов.

Миканиты – листовые или рулонные материалы, склеенные из отдельных лепестков слюды с помощью клеящего лака или сухой смолы, иногда с применением волокнистой подложки из бумаги или ткани, которая наклеивается с одной стороны или с обеих сторон; подложка увеличивает прочность материала на разрыв и затрудняет отслаивание лепестков слюды при изгибе материала.

Вследствие содержания большого количества (не менее 50% по массе) слюды миканиты обладают сравнительно высокой нагревостойкостью и относятся к классу В даже при употреблении обычных клеящих веществ и органических подложек. При использовании специальных клеящих веществ и неорганических подложек (например, стеклоткани) получаются материалы классов F и H. Нагревостойкие (без содержания органических веществ) миканиты, как и чистая слюда, относятся к классу нагревостойкости С.

Для производства многослойных миканитов связующее или насыпают между каждыми двумя слоями слюды в виде тонкого порошка сухой смолы и спрессовывают, или же насыпанную до нужной толщины слюдяную заготовку пропитывают клеящим составом.

Изготовление миканитов производится на поточных механизированных линиях. Гибкие ленты миканитов, содержащие один слой слюды, называемые микалентой, применяются в основной изоляции многих электрических машин для гибких прокладок, в обмотках секций, пазовой изоляции. Твердые многослойные миканиты применяют в виде штамповочных заготовок для шайб, фланцев, коллекторных манжет и прокладок между медными пластинами коллекторов электрических машин и других фасонных изделий.

Стремление исключить трудоемкий процесс изготовления из щепаной слюды миканитов и использовать слюдяные отходы, не пригодные для производства миканитов, привело к созданию новых прогрессивных материалов на основе слюды.

Они превосходят миканиты по многим показателям, являются вместе с тем более дешевыми, менее трудоемкими в изготовлении и с успехом заменяют миканиты во всех областях их применения.

Эти материалы изготавливаются из слюдяных бумаг. Их называют слюдинитами или слюдопластами в зависимости от вида применяемой в них бумаги.

Слюдинитовые и слюдопластовые бумаги получают из непромышленных отходов слюды.

Слюдинитовая бумага изготовляется преимущественно из мусковита следующим образом. Отходы слюды – мусковита – подвергают термохимической обработке: нагревают до 700–900 °С в течение 30...60 минут. При этих температурах происходит обезвоживание мусковита. Он теряет приблизительно 50% своей кристаллизационной воды. При обезвоживании происходит расслоение кристаллов, снижается прочность связей между пластинками, в результате чего они вспучиваются (увеличиваются в толщине), становятся рыхлыми. После этого слюда подвергается гидравлической или химической обработке, например, погружается в горячем состоянии в содовый раствор, в результате чего разрыхляется еще больше. Последующая обработка в кислоте (для нейтрализации соды) вызывает дальнейшее набухание пластин слюды (толщина их увеличивается до 1000 раз), связь между отдельными листочками становится очень слабой, и в результате при перемешивании постепенно образуется однообразная масса, состоящая из мелких тонких чешуек слюды (слюдяная пульпа). Полученная пульпа отливается на специальных бумагоделательных машинах и в результате получаются слюдини-

товые бумаги или картоны. Элементарные частицы слюдинитов имеют толщину около 1 мкм, длина и ширина их порядка десятых долей миллиметра. Слюдинитовая бумага выпускается толщиной от 19 до 150 мкм.

Флогопиты значительно более нагревостойки, чем мусковиты. У них обезвоживание наступает в интервале температур 1120...1230 °С. Поэтому из флогопита (а также и мусковита) получают слюдяные бумаги без термохимической обработки сырья.

Бумаги, полученные из нетермообработанного нагревостойкого флогопита, называют *слюдопластовыми бумагами*. При их получении используют свойство чистых тонкорасщепленных слюдяных частиц: прочно соединяться между собой под действием сил когезии. В зонах слипания образуется оптически плотный контакт. Электрические и механические свойства слипнувшихся частиц слюды не отличаются от сплошной слюды. В производстве слюдопластовой бумаги измельченные чешуйки слюды отливаются на бумагоделательной машине как и слюдинитовые бумаги.

Флогопитовая слюдопластовая бумага сохраняет в значительной степени механические свойства до 800 °С, она слабо подвержена тепловому старению имеет гибкость и не растрескивается на воздухе при быстром изменении температуры. Поэтому флогопитовые слюдопластовые бумаги наиболее предпочтительны для изготовления на их основе электроизоляционных материалов для электронагревательных элементов бытового и промышленного назначения.

Слюдиниты и слюдопласты. Это материалы, изготовленные из одного или нескольких слоев слюдинитовых или слюдопластовых бумаг с использованием различных связующих и подложек.

По назначению различаются следующие виды слюдинитов и слюдопластов: гибкие, формовочные, коллекторные, прокладочные, жаропрочные.

В зависимости от вида получаемого материала технологические процессы их изготовления несколько видоизменяются.

Гибкие слюдяные ленты состоят из одного слоя (иногда из двух слоев) бумаги с односторонней или двусторонней стекловолокнистой подложкой. Основной отличительной особенностью всех гибких слюдяных материалов является хорошая гибкость при 20 °С. Это важное свойство обеспечивает применение их в виде прокладок в различных изделиях. Гибкость придают применяемые связующие.

Слюдинитовые гибкие ленты бывают двух видов – пропитанные и сухие. Пропитанные ленты пропитываются лаками, компаундами, которые являются одновременно и склеивающими материалами.

Сухие слюдинитовые ленты изготовляют с небольшим количеством склеивающего материала, не пропитывающего ни слюдинитовую бумагу, ни подложку.

На основе гибких сухих и пропитанных слюдинитовых и слюдопластовых лент со связующим из эпоксидных компаундов или кремнийорганических лаков и подложки из стеклоткани выполняется термостойкая термореактивная изоляция для электродвигателей и турбогенераторов типа «монолит» и «слюдотерм» нагревостойкости классов *F*, H.

При изготовлении такой изоляции применяется различная последовательность технологических операций. В одних случаях лента предварительно пропитывается под вакуумом связующим составом, затем наматывается с перекрытием в несколько слоев на токоведущие части обмотки машины и подвергается опрессовке в нагретом состоянии, во время которой пропиточный состав полимеризуется – запекается.

В другом случае наматывается сухая лента. Затем производится пропитка горячим составом под давлением, опрессовка и полимеризация состава (запечка).

Электрические характеристики «монолита» и «слюдотерма» высокие:

при $t = 20$ °C $E_{пр} = 32...35$ кВ/мм; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}01$;

при $t = 130$ °C $E_{пр} = 30...32$ кВ/мм; $\mathrm{tg}\delta = 0{,}08$.

Формовочные слюдосодержащие материалы представляют собой подпрессованные листовые материалы, изготовленные из нескольких слоев слюдяных бумаг (слюдинитовых или слюдопластовых), склеенные с помощью связующего с подложкой или без нее.

Они предназначены для изготовления различных сложных форм (трубок, гильз) методом формования в нагретом состоянии при температуре 70...90 °C.

В качестве связующего применяются глифталевые, кремнийорганические лаки, а для жаростойких формовочных слюдопластов – алюмофосфатное связующее. Содержание связующего составляет 15...35%.

В качестве подложки используют лавсановую или полиамидную пленки, а также стеклослюдинитовую. Пленки увеличивают механические свойства изделий.

Электрические показатели формовочных материалов:

$\rho_v \approx 10^{10}$ Ом·м при 20 °С; $\rho_v \approx 10^6$ Ом·м при 600 °С;

$tg\delta \approx 0{,}05$ при 20 °С; $tg\delta \approx 0{,}3$ при 600°С;

$E_{пр} \approx 20$ МВ/м при 20 °С; $E_{пр} \approx 8$ МВ/м при 600 °С.

Их электрические показатели очень мало изменяются при старении.

Коллекторные и прокладочные слюдиниты и слюдопласты получают после горячего прессования слюдинитовых картонов или нескольких слоев слюдопластовых бумаг со связующим. Эти материалы выпускаются в виде листов размерами не менее 200 × 400 мм толщиной от 0,3 до 1,5 мм. В качестве связующего используется глифталевая, эпоксидная или кремнийорганическая смола. Содержание связующего определяется требованием отсутствия вытекания его при эксплуатации. В прокладочных материалах количество связующего (до 15%) несколько больше, чем в коллекторных (до 9%). Связующее определяет диапазон рабочих температур.

Главное требование к этим материалам – отсутствие расслоения при нарезке и в процессе работы. Проверяются материалы в циклличном режиме теплового старения: цикл 14 сутки при 100 °С; 4 суток при 180 °С и 1 сутки при 200 °С. После каждого цикла выдерживаются 1 сутки при 20°С и влажности 95%. При таких испытаниях миканиты обычно рассыпаются (табл. 8).

Таблица 8

Свойства слюдопластов

Параметр	ПИФШ	ПИФША	ПИФТ
$E_{пр}$, МВ/м	26	26	26
E_{min}, МВ/м	20	20	20
ρ, Ом·м, при 95% влажности	10^8	10^8	10^{11}
ρ, Ом·м	10^{11}	10^{11}	10^{11}
Связующее, %	7…15	3…6	2…5

Марки ПИФШ, ПИФША относятся к классу нагревостойкости В, ПИФТ – класс С.

П – прокладочный; И – слюдопласт;

Ф – флогопит;

Т – стеклотканевая подложка;

Ш – связующее – шеллак;

А – пониженное содержание связующего.

Слюдопласт ПИФТ может работать при t = 400...500 °С, а в поджатом состоянии – до t = 800 °С.

Для получения высоконагревостойких коллекторных и прокладочных слюдопластов используют подложку из стеклоткани или лавсановой пленки и неорганические связующие (алюмохромфасфат).

Высоконагревостойкие слюдопласты и слюдиниты (гибкие, формовочные, прокладочные) применяются для изготовления межслоевой и корпусной изоляции машин и аппаратов, а также для изоляции электротермического оборудования. Длительная рабочая температура их составляет 850 °С для низковольтного оборудования и 600 °С для высоковольтного.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники: учебник / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. – М.: Изд-во «Лань», 2002.

2. Богородицкий, Н.П. Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.

3. Справочник по электротехническим материалам / под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – М.: Энергоатомиздат, 1986, т. 1; 1987, т. 2; Л.: Энергоатомиздат, 1988, т.3.

Учебное издание

РЖЕВСКАЯ Светлана Пахомовна

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ. ДИЭЛЕКТРИКИ

Курс лекций

Редактор Л.Н. Шалаева
Технический редактор О.В. Дубовик
Компьютерная верстка О.В. Дубовик

Подписано в печать 29.04.2009.
Формат $60\times84^{1}/_{16}$. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 8,25. Уч.-изд. л. 6,46. Тираж 200. Заказ 814.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.
ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.
Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.